

多因素多目标国 V 排放生物柴油混合燃料发动机性能优化

楼狄明, 房 亮, 胡志远, 谭丕强

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

Multi-Factor and Multi-Objective Performance Optimization of a Engine Emitted to China V Emission Standard Biodiesel-Diesel Blend Fuel Engine

LOU Diming, FANG Liang, HU Zhiyuan, TAN Piqiang

(School of Tongji Automotive Studies, Shanghai 201804, China)

Abstract: By adjusting the 6 injection parameters (p_{fin} , T_{fin} , T_{int} , Q_{pre} , T_{inta} , Q_{after}), the multi-factor and multi-objective performance optimization of the biodiesel engine was researched on a high pressure common-rail diesel engine fueled with 20% biodiesel and 80% diesel. By using hybrid DoE, a multi-factor optimization plan of 9 different operating points was designed and the bed test was carried out to collect the engine performance and emission data. According to the test results, the mathematical model of the performance indexes of the engine was fitted by means of the hybrid RBF algorithm, and the optimization equation was designed. Then the global multi-objective optimal solution was solved by the combinational optimization algorithm with the goal of minimum BSFC and minimum NO_x emission. This method can make up for the limitation of the traditional optimization method using single factor one by one. After the optimization, the average BSFC of the selected 9 operating points can be reduced by 2.71%, while the average NO_x emission is reduced by 24.59%.

摘要: 在一台国 V 排放高压共轨柴油机上燃用 20% 生物柴油-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、后喷油量 6 个喷油控制参数研究生物柴油发动机的多因素多目标优化方法。采用混合试验设计方法分别针对低、中、高转速下的低、中、高负荷 9 个工况点设计试验方案, 并进行台架试验采集发动机性能及排放数据。根据试验结果用混合径向基函数神经网络模型 (Hybrid RBF) 拟合发动机各项性能指标数学模型, 设计优化方程并利用组合优化算法求解以比油耗 (BSFC) 最小和氮氧化物 (NO_x) 排放最小为目标的全球多目标最优解, 弥补了传统发动机优化标定方法单因素逐一优化的局限性。优化结果使得所选取的 9 个工况点的 BSFC 平均降幅为 2.71%, 同时 NO_x 排放平均降幅高达 24.59%。

关键词: 内燃机; 混合试验设计; 混合优化; 多因素分析; 多目标优化

Key words: IC engine; hybrid optimization; multi-factor analysis; multi-objective optimization

DOI: 10.13949/j.cnki.njgc.2017.01.006

中图分类号: TK427

文献标识码: A

0 概述

自 2009 年起中国汽车产销量连续多年保持世界第一,2011 年中国汽车保有量破亿,2014 年增至近 1.4 亿辆^[1]。汽车的大量增加直接导致了能源短缺和空气污染两大严峻的资源环境问题。能源方面,2013 年 9 月,中国已经超越美国成为全球最大的石油消费国,日均进口的石油达到 $630 \times 10^4 \text{ t}$ 。环境方面,汽车尾气排放所导致的大气污染越来越严重。研究表明在绝大多数大中型城市,非供暖季机动车排放对城市污染贡献率达到 50% 以上,甚至可超过 70%。

发展车用替代燃料是世界各国家和地区实现低碳转型的重要途径之一,车用替代燃料已经得到诸多国家的广泛应用^[2]。生物柴油与传统柴油相似,颗粒物质量排放较低,且为可持续绿色能源,得到欧美各国的广泛认可。欧美各国已开始推广使用低比例生物柴油-柴油混合燃料^[3-6]。但是生物柴油与普通柴油的热值、黏度等理化性质不同,要最大限度地发挥生物柴油在节能减排上的优势,就需要对发动机燃油喷射系统进行有针对性的标定优化^[7-8]。

传统的发动机燃油系统优化标定主要采用单因素逐一优化,不考虑各喷油参数间的交互作用,随着多次喷射技术的发展,这种方法逐渐难以满足优化需求^[9-10]。本文通过混合试验设计方法设计多因素试验方案,在某国 V 排放高压共轨柴油机上燃用 20% 生物柴油-柴油混合燃料(简称 B20)进行试验采样,再通过模型拟合和组合优化计算,研究匹配催化型颗粒捕集器(CDPF)和单一选择性催化还原技术(SCR)的国 V 排放柴油机不进行任何改造时,燃用 B20 生物柴油的多因素优化和多目标优化结合的全局优化标定方法。

1 试验方案及台架^[11]

1.1 试验方案

所优化发动机为上海柴油机厂生产的 SC9DF 国 V 排放柴油发动机,原机匹配了日本电装公司的高压共轨燃油喷射系统。不对发动机喷油系统进行结构改动,在原有发动机电子控制单元(ECU)喷油控制参数的基础上,保证主喷油量(Q_{main})不变,通过对燃用生物柴油-柴油混合燃料后的发动机进行优化标定,以满足较好的燃油经济性和排放特性。主要调节的喷油参数有共轨压力(p_{fin})、主喷定时(T_{fin})、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 1 为高压共

轨燃油喷射系统多次喷射示意图。

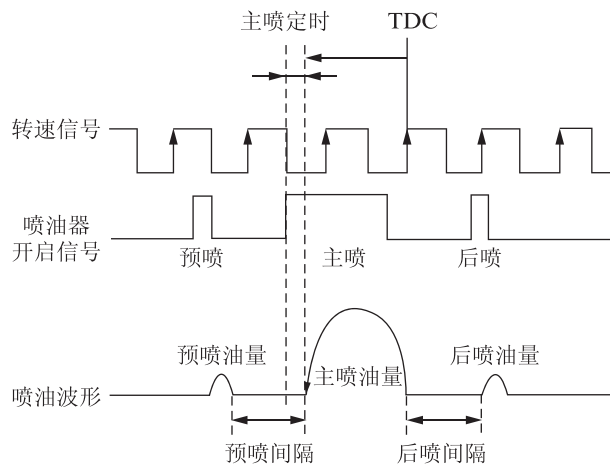


图 1 高压共轨燃油喷射系统多次喷射示意图

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,优化试验标定要对每个重要工况点进行试验设计和优化,本文选取 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,工况点转速、转矩和负荷见表 1。

表 1 代表工况点的转速、转矩和负荷

工况点	转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	转矩/($\text{N} \cdot \text{m}$)	负荷率/%
1	1 337	254	25
2	1 337	508	50
3	1 337	762	75
4	1 657	253	25
5	1 657	506	50
6	1 657	758	75
7	1 976	227	25
8	1 976	454	50
9	1 976	681	75

试验采用离线稳态优化标定方法,对于瞬态排放的优化标定另作研究。针对每个工况点进行 6 个喷油因素的混合试验设计,设置试验点分布边界条件,在保证试验精度的前提下尽可能减少试验点个数,制定由 64 点的空间填充试验设计^[12]和 28 点的 V 最优试验设计^[13]两种现代试验优化算法组合而成的混合试验设计方案。对不合理试验点进行筛选,最终分别形成 9 个工况点下生物柴油专用发动机 90 个点左右的多因素优化标定试验方案。以 1 657 r/min 转速、506 $\text{N} \cdot \text{m}$ 转矩工况为例,试验点三维分布如图 2 所示。

1.2 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,保证高压共轨燃油喷射系统的总

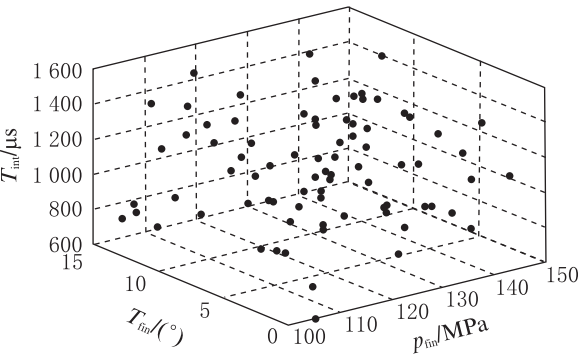


图 2 1 657 r/min、506 N·m 转矩工况试验点分布图

喷油量不变,采用“转速-转矩”模式控制,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工况、不同喷油参数下的性能及排放特性。

1.3 试验燃油

生物柴油发动机所使用的是体积分数为 80% 的国 V 柴油与体积分数 20% 的生物柴油混合燃料 (B20),生物柴油的主要来源是餐厨废油。

2 试验优化

2.1 模型拟合

在试验台架上对每个试验方案点进行 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及排放数据。

使用 MATLAB 的 MBC 工具箱,建立一个点阵 (point-by-point) 的发动机优化标定模型,选用二次线性回归和径向基函数神经网络模型结合的混合径向基函数神经网络 (hybrid-RBF) 算法,对每个工况点进行模型拟合。该算法先用多项式回归拟合大致拟合模型,然后再利用神经网络算法拟合模型误差,从而在保证较高拟合精度的同时尽可能地减少过拟合的影响^[14]。表 2 为中速中转矩工况下 NO_x 排放数据模型拟合对比。对同样一组数据,2 阶多项式和 3 阶多项式拟合与 RBF 算法均有其优势和不足之处,Hybrid RBF 算法相比于其他常用算法明显具有较高精度。

对比多组模型拟合结果,分析模型的均方根误差 (RMSE)、预测均方根误差 (PRESS RMSE)、赤池信息量 (AIC 和 AICc)、贝叶斯信息量 (BIC)、广义交叉验证 (GCV)、回归精度评价系数 R² 和调整 R² 及雅克比矩阵条件 (Cond(J)) 等一系列拟合评价指标,筛选出各工况点下 6 个喷油参数的发动机性能排放最优响应模型^[15-16]。图 3 为 1 657 r/min、253 N·m 工况下有

表 2 发动机中速中转矩工况下 NO_x 排放数据模型拟合对比

项目	参数			
拟合方法	2 阶多项式	3 阶多项式	RBF	Hybrid RBF
参数数量	26	84	17	43
RMSE	0.29	0.21	0.24	0.08
PRESS RMSE	0.39	38.22	0.25	0.12
R ²	1	1	1	1
调整 R ²	1	1	1	1
AIC	-185.09	-474.63	-225.77	-410.66
AICc	-153.46	无解	-215.44	-313.74
BIC	-114.26	-267.00	-181.85	-303.92
Cond(J)	8.93	726.06	8 207.07	395.76

效燃烧消耗率 (BSFC) 模型学生化残差。由图 3 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]。

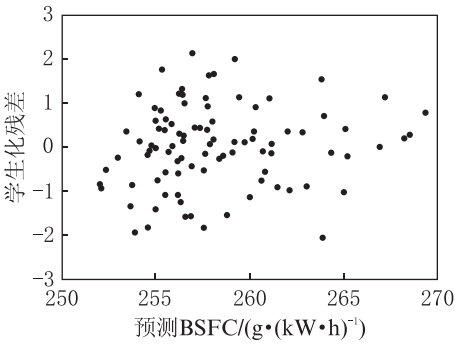


图 3 1 657 r/min、253 N·m 工况下 BSFC 模型残差

以 1 337 r/min 转速、508 N·m 转矩为例,模型的 BSFC 拟合方程如式 (1) 所示。拟合后的模型包含了 6 个喷油参数及其 2 次方项,同时还包含了各喷油参数之间的交互项,拟合方程各项前的系数可以看出每一项对发动机性能和排放的重要性。相比于传统逐一因素标定的方法,多因素试验设计及模型拟合充分考虑了各因素之间交互作用的可能性,因此比传统标定方法更加精确全面。

$$\begin{aligned} b_e = & 211.46 - 0.57p_{fin} + 1.75T_{fin} + 0.85T_{int} - \\ & 0.51Q_{pre} + 0.53T_{inta} + 0.15Q_{after} + \\ & 2.32p_{fin}T_{fin} - 1.02p_{fin}Q_{after} - 0.37p_{fin}T_{inta} - \\ & 0.33p_{fin}Q_{after} + 7.46T_{fin}^2 + 1.91T_{fin}Q_{pre} - \\ & 1.49T_{int}^2 + 1.91T_{int}Q_{pre} + 0.28Q_{pre}T_{inta} + \\ & 1.09T_{inta}^2 - 0.51T_{int}Q_{after} + \Delta \end{aligned} \quad (1)$$

式中, b_e 为 BSFC; Δ 表示神经网络模型模拟误差。

2.2 优化方程

该试验发动机原机采用国内柴油机市场主流的 SCR 的后处理方式以降低 NO_x 排放,为尽可能降低颗粒物排放而使得发动机裸机 NO_x 排放很高。国 V

排放生物柴油发动机采用 CDPF+SCR 后处理技术,能够很好地控制 NO_x 和颗粒物的排放,可以针对生物柴油和配套的后处理系统优化方程,找到新的发动机性能最优点。

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,发动机污染物排放在经过后处理装置能够达到国 V 排放法规要求,优化方程如式(2)所示:

$$\begin{cases} \min f_{\text{BSFC}}(p_{\text{fin}}, T_{\text{fin}}, T_{\text{int}}, Q_{\text{pre}}, T_{\text{inta}}, Q_{\text{after}}) \\ \min f_{\text{NO}_x}(p_{\text{fin}}, T_{\text{fin}}, T_{\text{int}}, Q_{\text{pre}}, T_{\text{inta}}, Q_{\text{after}}) \\ \text{S. T.} \\ f_{\text{PM}}(p_{\text{fin}}, T_{\text{fin}}, T_{\text{int}}, Q_{\text{pre}}, T_{\text{inta}}, Q_{\text{after}}) \leq C_{\text{PMlim}} \\ f_{\text{PN}}(p_{\text{fin}}, T_{\text{fin}}, T_{\text{int}}, Q_{\text{pre}}, T_{\text{inta}}, Q_{\text{after}}) \leq C_{\text{PNlim}} \\ f_{\text{CO}}(p_{\text{fin}}, T_{\text{fin}}, T_{\text{int}}, Q_{\text{pre}}, T_{\text{inta}}, Q_{\text{after}}) \leq C_{\text{COlim}} \\ f_{\text{HC}}(p_{\text{fin}}, T_{\text{fin}}, T_{\text{int}}, Q_{\text{pre}}, T_{\text{inta}}, Q_{\text{after}}) \leq C_{\text{HClim}} \\ f_{\text{SmokeA}}(p_{\text{fin}}, T_{\text{fin}}, T_{\text{int}}, Q_{\text{pre}}, T_{\text{inta}}, Q_{\text{after}}) \leq C_{\text{SmokeAlim}} \\ f_{\text{SmokeP}}(p_{\text{fin}}, T_{\text{fin}}, T_{\text{int}}, Q_{\text{pre}}, T_{\text{inta}}, Q_{\text{after}}) \leq C_{\text{SmokePlim}} \\ f_{\text{Texh}}(p_{\text{fin}}, T_{\text{fin}}, T_{\text{int}}, Q_{\text{pre}}, T_{\text{inta}}, Q_{\text{after}}) \geq C_{\text{Texhlim}} \end{cases} \quad (2)$$

式中, C_{PMlim} , C_{PNlim} , $C_{\text{SmokeAlim}}$, $C_{\text{SmokePlim}}$ 分别为颗粒物质量浓度(PM)、颗粒物数量浓度(PN)、烟度均值(smokeAVG)、烟度峰值(SmokePeak)的限值; C_{COlim} , C_{HClim} 为一氧化碳(CO)和总碳氢(HC)的排放限值, $C_{\text{COlim}} = 1.5 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, $C_{\text{HClim}} = 0.46 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$; C_{Texhlim} 为排气温度限值。由于所采用 CDPF 的转化率可以达到 90%以上,所以 PM 和 PN 的限制定为法规要求的 10 倍,即 $C_{\text{PMlim}} = 0.2 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, $C_{\text{SmokeAlim}} = 0.5 \text{ m}^{-1}$ 。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,本文所采用的后处理装置要求排气温度在 $230 \sim 600 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间,因此要求 $C_{\text{Texhlim}} = 230 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

该优化结果将大幅减少原机尿素的消耗量以降低使用成本和氨泄漏的风险,同时减小尿素箱的体积使得车辆使用空间更大。

2.3 外特性功率恢复

生物柴油的热值相对纯柴油较低,直接燃用 B20 会导致发动机最大功率和转矩有所下降。因为电控高压共轨燃油喷射系统的总喷油量受到转速、转矩、负荷等工况因素控制,在非满负荷点,发动机在燃用生物柴油时会自动根据目标转矩增加负荷,从而增加总喷油量以达到指定工况的动力性要求。然而,在满负荷点,由于受到发动机外特性 MAP 限

制,最大总喷油量无法继续提高,因此在外特性点发动机的功率和转矩会低于燃用纯柴油(D100)时,需要人为适当提高外特性 MAP 对总喷油量的限制值,改善发动机燃用 B20 时最大功率点和最大扭矩点等满负荷点的动力性。

图 4 为发动机外特性原机、B20 原机和标定后的功率和转矩。在常用转速 $1200 \sim 1800 \text{ r/min}$ 之间每隔 100 r/min 标定一次,其余转速每隔 200 r/min 标定一次。从图 4 可以看出,在 100% 负荷下发动机的功率随转速的升高而升高,转矩随转速的增大先增大再减小,峰值出现在 1400 r/min 附近。发动机燃用 B20 后,外特性的功率和转矩都略有下降,因此需要对发动机的外特性进行重新标定,提高 Q_{fin} 使得燃用 B20 专用发动机能够达到原机的动力性水平。在提高总喷油量外特性限制后,发动机的功率和转矩都随着喷油量的提高而提高,最终达到与原机的功率和转矩基本相同的水平。

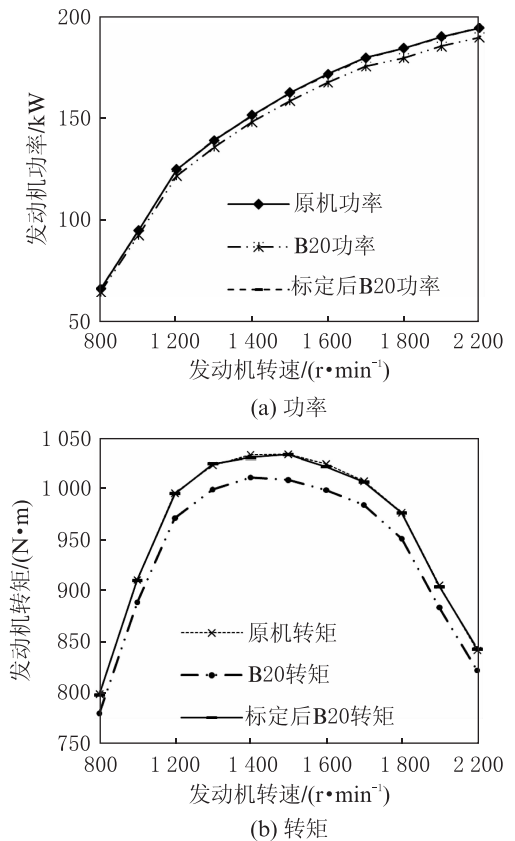


图 4 发动机外特性原机、B20 原机和标定后的功率和转矩

2.4 优化方法

除梯度法、拉格朗日乘数法等经典优化算法外,现代优化算法有信赖域法(fopton)、遗传算法(GA)、模式搜索法和法线-边界交集算法(NBI)。信赖域法优化精度较高,但容易陷入局部最优区域中;遗传算法可以在全局范围进行寻优,但是求得最优解的精度

不是很高。本文中采用将信赖预算法与遗传算法结合的混合优化算法,先根据不同的起点利用 GA 遗传算法求得最优解所在大致区域,然后利用 fopton 信赖域算法求解准确的单目标全局最优解^[18]。

由于所选用发动机的后处理装置采用了较先进的 CDPF 颗粒物捕集技术,颗粒物捕集率很高,且柴油发动机 CO 和 HC 排放较低,所以分别选取 BSFC 最小和 NO_x排放量最小两个目标进行全局最优解选取,然后以两个目标的最优解为起点,利用 NBI 算法进行 BSFC 最小和 NO_x排放量最小的多目标优化,求得一组多目标优化的解。

2.5 单目标 BSFC 最小优化结果

以各喷油参数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较优解,以确定单目标全局最优解所在的区域。

然后以优化结果点为起始点,继续以最小 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点附近找到一个单目标优化全局最优点。表 3 为以 BSFC 最小为目标的 9 个工况混合优化(GA+fopton)全局最优解。从表 3 可以看出,要得到较好的燃油经济性,需要共轨压力和喷油提前角适当增大,在低负荷和低转速工况下适量引入预喷射,并在中负荷下适量引入后喷射。

表 3 以 BSFC 最小为目标的 9 个工况混合优化(GA+fopton)全局最优解

工况点	p_{lin}/MPa	$T_{lin}/(^{\circ})$	$T_{int}/\mu\text{s}$	$Q_{pre}/(\text{mm}^3 \cdot \text{st}^{-1})$	$T_{inta}/\mu\text{s}$	$Q_{after}/(\text{mm}^3 \cdot \text{st}^{-1})$	原机 BSFC/ ($\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$)	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

图 5 为单目标优化前后 BSFC 的变化情况。从图 5 可以看到,经过 GA 初步优化后,在各工况下发动机燃用 B20 的 BSFC 略微下降;再经过 fopton 优化后,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,经过单目标混合优(GA+fopton)后,BSFC 在各工况下均优于 GA 初步优化结果,BSFC 平均降幅达到 B20 原机的 2.71%。

2.6 单目标 NO_x 排放最小优化结果

与 BSFC 优化方法相近,以各喷油参数取值范围中点为起始点,以最小 NO_x排放量为目标,设置 BSFC 不高于原机。先利用 GA 遗传算法确定单目标全局最优解所在的区域,然后再以优化结果点为起始点,利用 fopton 信赖域法确定全局最优点。表 4 为以 NO_x排放最小为目标的 9 个工况混合优化(GA+fopton)全局最优解。从表 4 可以看出,要得到较好的 NO_x排放特性,需要共轨压力和喷油提前角尽量小,且在低负荷工况下适当引入预喷射和后喷射。

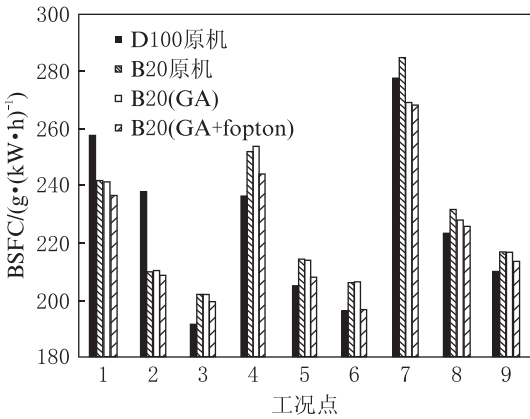


图 5 单目标优化前后 BSFC 的变化情况

图 6 为单目标优化前后 NO_x排放的变化情况。从图 6 可以清晰地看到,经过 GA 初步优化后,在各工况下发动机燃用 B20 的 NO_x排放均有大幅度下降;再经过 fopton 优化后,在各工况下发动机燃用 B20 的 NO_x排放明显低于发动机燃用纯柴油和 B20 的原机状态,且均不同程度低于 GA 初步优化结果。相比于燃用 B20 原机状态,经过单目标混合优化(GA+fopton)后,各工况点 NO_x排放平均降幅达到

表 4 以 NO_x排放最小为目标的 9 个工况混合优化(GA+fopton)全局最优解

工况点	$p_{in}/$ MPa	$T_{in}/$ (°)	$T_{int}/$ μ s	$Q_{pre}/$ ($\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	$T_{inta}/$ μ s	$Q_{after}/$ ($\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	原机 NO _x 排放/ ($\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$)	NO _x 排放/ ($\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$)
1	90.00	0.00	1 176.61	4.36	1 500.00	15.00	14.64	3.99
2	90.00	0.00	1 500.00	5.98	800.00	0.00	11.66	4.91
3	105.00	2.28	600.00	0.00	800.00	0.00	9.85	5.62
4	109.30	0.00	1 067.49	0.00	800.00	9.98	10.17	4.20
5	105.00	0.00	1 178.77	3.00	800.00	9.98	11.69	5.02
6	110.00	1.27	600.00	3.00	1 499.86	0.00	10.06	5.17
7	100.00	0.00	727.11	9.99	966.96	9.98	12.26	2.27
8	105.00	0.78	600.00	0.00	839.47	0.00	11.01	4.34
9	160.00	0.00	600.00	0.00	800.00	0.00	10.12	4.22

B20 原机的 59.81%。

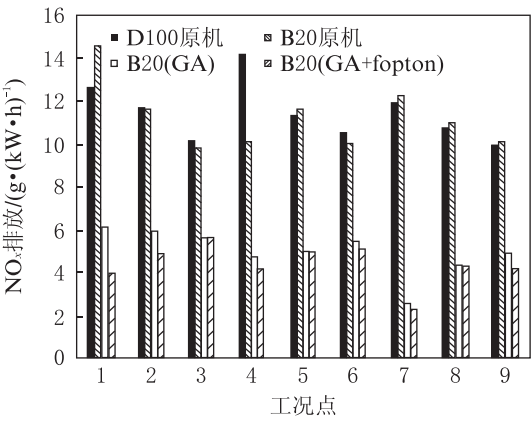


图 6 单目标优化前后 NO_x的变化情况

2.7 多目标优化结果及分析

利用 NBI 优化算法,以最小 BSFC 和最小 NO_x 排放作为两个优化目标。基于以最小 BSFC 和 NO_x 排放为单目标的两组优化结果,将其作为 NBI 优化的起始点,在相同的限制条件下,进行优化计算得出一系列 NBI 优化结果。从可行的计算结果中找出一组比较合理的喷油参数组合作为优化分析的最优解。

图 7 为燃用 D100、B20 原机状态及 NBI 多目标优化后的 BSFC。从图 7 可以看出,经过 NBI 多目标优化后,在低、中、高转速的低、中、高转矩下,各工况点 BSFC 均有一定程度的下降,降幅最明显的点下降幅度高达 3.6%,各工况点 BSFC 平均降幅达到 1.31%;燃用 B20, NBI 优化后各工况点的 BSFC 均低于优化前的原机状态,与燃用 D100 的 BSFC 接近,在低转速中、低转矩和高转速低转矩工况点甚至低于燃用 D100 时的状态。

图 8 为燃用 D100、B20 原机状态及 NBI 多目标优化后的 NO_x 排放。从图 8 可以看出,经过 NBI 多目标优化后,各工况点 NO_x 排放均有一定程度的下降,降幅最明显的点下降幅度高达 87.33%,也有少数工况点 NO_x 排放略微升高,各工况点 NO_x 排放平

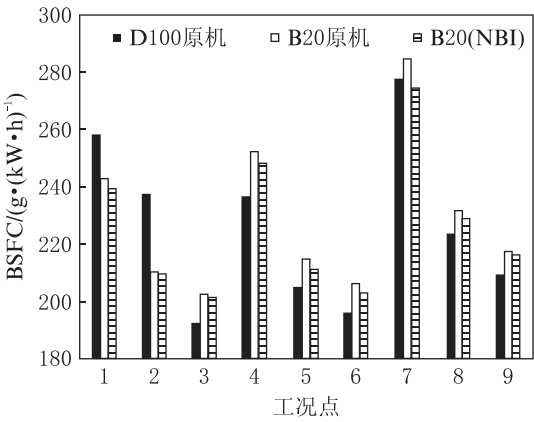


图 7 燃用 D100、B20 原机状态及 NBI 多目标优化后的 BSFC 均降幅达到 24.59%;燃用 B20 时,NBI 优化后各工况点的 NO_x 排放基本都低于优化前的原机状态,并且降幅比较明显;多数工况点优化后的 NO_x 排放也明显低于燃用 D100 的 NO_x 排放,仅在高转速高转矩的工况下 NO_x 排放有小幅升高。

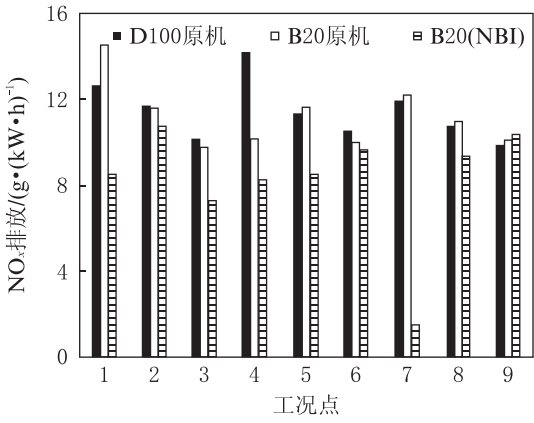


图 8 燃用 D100、B20 原机状态及 NBI 多目标优化后的 NO_x 排放

3 结论

(1) 选用空间填充设计和 V 最优设计相结合的

混合试验设计方法,应用 Hybrid RBF 拟合发动机性能及排放模型,可以充分反映出各喷油参数间的交互作用,准确高效地描述发动机的性能与喷油参数的关系。

(2) 通过 GA 遗传算法和 fopton 信赖域算法及 NBI 算法形成的混合优化算法,可以较好地提高模型优化计算的准确度,避免局部最优情况产生。

(3) 根据排放法规及后处理系统要求建立优化试验的方程,先分别进行以最小 BSFC 和最小 NO_x 排放为目标的单目标优化,优化结果使得优化后的 BSFC 相对 B20 原机降低了 2.71%, NO_x 排放相对 B20 原机排放降低了 59.81%。

(4) 基于单目标优化的试验点结果,采用多目标 NBI 优化,在排放法规的限制内,最终优化结果使得低、中、高转速的低、中、高转矩这 9 个工况点的 BSFC 均有不同程度的下降,平均降幅为 1.31%,同时使得这 9 个工况点的 NO_x 排放有明显的下降,平均降幅高达 24.59%。

参考文献:

- [1] 张南. 2012 年中国汽车市场关键数据[J]. 经营者(汽车商业评论),2013(1):71-73.
ZHANG N. The key statistics of chinese automotive market in 2012[J]. Operators (Auto Business Review),2013(1):71-73.
- [2] 张天舒. 发展车用替代燃料的国际经验及影响因素[J]. 中外能源,2013,18(7):20-24.
ZHANG T S. International experience and influencing factors on the development of alternative fuels [J]. Sino-Global Energy,2013,18(7):20-24.
- [3] KUTAS G, LINDBERG C, STEENBLIK R. Biofuels-at what cost government support for ethanol and biodiesel in the European Union [R]. One of a Series of Reports Addressing Subsidies for Biofuels in Selected OECD Countries,2007.
- [4] FONSECA M B, BURRELL A, GAY S H, et al. Impacts of the EU biofuel target on agricultural markets and land use: a comparative modelling assessment [R]. JAC Scientific and Technical Reports,2010.
- [5] 赵群,王红岩,刘德勋,等. 世界生物柴油产业发展现状及我国生物柴油发展建议[J]. 广州化工,2012,40(17):44-45.
ZHAO Q, WANG H Y, LIU D X, et al. World biodiesel development situation and development suggestions of that in China[J]. Guangzhou Chemical Industry,2012,40(17):44-45.
- [6] PADULA A D, SANTOS M S, FERREIRA L, et al. The emergence of the biodiesel industry in Brazil: current figures and future prospects [J]. Energy Policy,2012,44:395-405.
- [7] TOMPKING B T, SONG H, BITTLE J A, et al. Efficiency considerations for the use of blended biofuel in diesel engines [J]. Applied Energy,2012,98:209-218.
- [8] 李博,楼狄明,谭丕强,等. 发动机燃用生物柴油的常规和非常规排放特性[J]. 内燃机工程,2009,30(5):22-26.
LI B, LOU D M, TAN P Q, et al. Regulated and non-regulated emission characteristics of an engine fuelled with bio-diesel[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2009,30(5):22-26.
- [9] BUNCE M, SNYDER D, ADI G, et al. Stock and optimized performance and emissions with 5 and 20% soy biodiesel blends in a modern common rail turbo-diesel engine [J]. Energy Fuels,2010,24(2):928-939.
- [10] 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.
NI J M, DU Q Y, ZHOU Y J, et al. Application of DoE in common rail diesel engine optimization design[J]. Transactions of CSICE,2009,27(3):231-236.
- [11] 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,2014.
- [12] KESSELS R, JONES B, GOOS P, et al. An efficient algorithm for constructing bayesian optimal choice designs [J]. Journal of Business & Economic Statistics, 2009, 27 (2): 279-291.
- [13] 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):66-68.
XIE H, CHEN L Y. Application research on space-filling experiments design in calibration of diesel engine [J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle, 2008, 37 (3): 66-68.
- [14] 罗芳琼. 基于混合优化的 RBF 神经网络模型研究[J]. 计算机与现代化,2013,215(7):51-55.
LUO F Q. Research on an optimized RBF neural network model applied to CPI forecast [J]. Computer and Modernization,2013,215(7):51-55.
- [15] 王怀亮. 交叉验证在数据建模模型选择中的应用[J]. 商业经济,2011(5):20-21.
WANG H L. Application of cross validation in choice of data modeling[J]. Business Economy,2011(5):20-21.
- [16] 王中宇,张海滨,刘智敏. 剔除离群值的学生化残差新方法[J]. 仪器仪表学报,2006,27(6):624-628.
WANG Z Y, ZHANG H B, LIU Z M. The novel method for outliers' rejection of the studentized residual error[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2006,27(6):624-628.
- [17] BURNHAM K P, ANDERSON D R. Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach[J]. Ecological Modelling,2004,175(1):96-97.
- [18] 胡琰,李国岫,李少鹏. 发动机匹配优化算法的研究[J]. 北京交通大学学报,2011,35(4):159-162.
HU D, LI G Y, LI S P. Research of engine match optimization algorithm[J]. Journal of Northern Jiaotong University,2011,35 (4):159-162.

(编辑:姜文玲)