

# 基于实际工况的 LPG 发动机排放控制参数优化

张忠波, 李礼夫

(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510641)

## Optimization of Emissions Control Parameters for LPG Engine under Practical Road Conditions

ZHANG Zhongbo, LI Lifu

(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** To reduce emissions of LPG engines in practical conditions, a typical LPG engine used for Guangzhou bus was taken as the research object and its emission characteristics were studied through a bench test system considering practical road conditions. With the relationship among engine emissions, emission control parameters and emission characteristics as a basis and by design of experiments (DoE), a statistics mathematical model of the engine was established, with which main emission control parameters were optimized combining with multi-objective optimization. The control parameters before and after optimization were input into the one-dimensional simulation model of the LPG engine to carry out engine performance simulation. The results show that after the optimization of the main control parameters, the HC and CO from the engine under experimental conditions are accumulatively reduced by 9.5% and 21.0% respectively and the maximum increase in torque is by 22.6%, but the accumulated emission of NO is increased by 2.7%.

**摘要:** 为减少发动机在实际工况中的污染物排放量,以广州市城市公交客车用典型(LPG)发动机为研究对象,结合广州市实际道路工况特点,通过台架试验分析了该发动机的排放性;根据发动机工况、排放控制参数与排放性之间的关系,通过试验设计,建立了该发动机统计学数学模型,结合多目标优化算法,对其主要排放控制参数进行了优化;将优化前后的控制参数分别导入 LPG 发动机一维仿真模型中,进行了广州市典型道路工况下的性能仿真试验。仿真试验结果对比表明:试验工况下,排放控制参数优化后,LPG 发动机 HC、CO 累计排放量分别减少 9.5%、21.0%,转矩最大增加 22.6%,但 NO 累计排放量增加 2.7%。

**关键词:** LPG 发动机; 实际工况; 排放; 控制参数; 多目标优化

**Key words:** LPG engine; practical condition; emissions; control parameter; multi objective optimization

**DOI:** 10.13949/j.cnki.nrjgc.2017.05.006

中图分类号: TK431

文献标识码: A

### 0 概述

发动机在技术参数一定的情况下,发动机排放

与其实际运行工况有密切关系<sup>[1]</sup>。城市公交客车(9座以上,总质量超过 5 000 kg)属于 M3 类车,GB 17691—2005 规定 M3 类车用发动机采用欧洲瞬态

收稿日期: 2016-06-05

基金项目: 广东省科技厅科技项目(201104008)

Fund Project: Department of Communications of Guangdong Province Science and Technology Project(201104008)

作者简介: 张忠波(1990—),男,博士生,主要研究方向为新能源发动机排放控制, E-mail: bobzhang3@qq.com。

循环(European transient cycle, ETC)工况进行排放认证<sup>[2]</sup>,但是大量文献指出 ETC 工况难以表征国内城市公交客车发动机实际运行工况<sup>[3-4]</sup>,因此基于 ETC 工况排放认证的发动机在实际车载使用过程中,发动机实际运行工况与排放认证工况的明显差异使其难以达到预期排放效果。

针对上述问题,为减少发动机在实际工况中的排放量,以广州市城市公交客车用典型液化石油气(liquefied petroleum gas, LPG)发动机为研究对象,通过台架试验系统,结合广州市实际道路工况特点,试验分析了其主要工况区的排放性;在此基础上,根据发动机工况、排放控制参数与排放性之间的关系,针对 LPG 发动机主要工况区,通过试验设计(design of experiments, DoE),并由 LPG 发动机一维仿真模型提供样本试验数据,快速建立了 LPG 发动机统计学数学模型,结合遗传算法对 LPG 发动机主要排放控制参数进行了优化;将优化前后的控制参数分别导入 LPG 发动机一维仿真模型中进行了广州市典型道路工况下的性能仿真对比试验。

1 LPG 发动机排放性研究

LPG 公交客车在广州市实际道路工况下运行时,发动机主要工况点集中分布在转速 $n < 1\,400\text{ r/min}$ 和转矩 $T_{\text{tq}} < 400\text{ N}\cdot\text{m}$ 的范围内<sup>[3]</sup>。为分析该机主要工况点集中分布区(即主要工况区)的排放性,利用台架试验系统对其进行了排放性试验。

1.1 台架试验系统

LPG 发动机台架试验系统包括 YC6112ZLQM 型 LPG 发动机、Woodward OH1.2 型 LPG 发动机控制系统、测功控制系统(湘仪 GW250 电涡流测功机、湘仪 FC2012 测控仪、湘仪 FC2110 驱动仪),广州福立 FLB-100 尾气分析仪、恒志福 HZF-150 电子称重仪及自主开发的发动机综合性能测试管理系统等。台架试验系统基本原理如图 1 所示。LPG 发动机主要技术参数如表 1 所示。

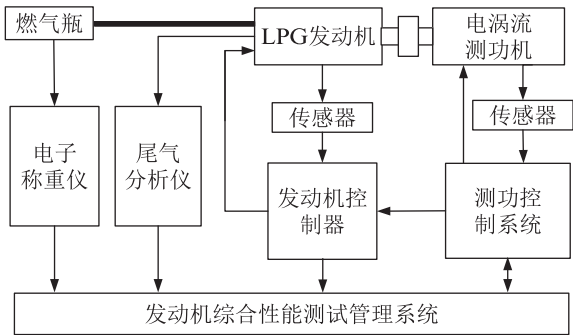


图 1 LPG 发动机台架试验系统基本原理

表 1 LPG 发动机主要技术参数

| 项目                          | 参数                     |
|-----------------------------|------------------------|
| 压缩比                         | 8.5                    |
| 缸数                          | 6                      |
| 标定转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 2 300                  |
| 最大转矩/(N·m)                  | 800(1 300~1 400 r/min) |
| 排放标准                        | 欧Ⅲ                     |

1.2 LPG 发动机排放性分析

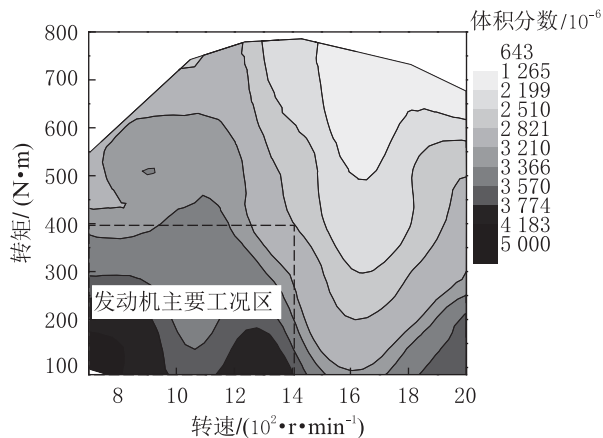
通过台架试验系统,在该 LPG 发动机转速 700~2 000 r/min,转矩 80~800 N·m 范围内均匀选择了 90 个工况点进行了排放特性试验,得到 LPG 发动机 CO、HC 及 NO 三种主要排放物在排气管中的原始排放(文中所有排放浓度均指排放体积浓度)特性,如图 2 所示。

由图 2(a)可知,该 LPG 发动机 HC 高排放区主要集中在中低转速低转矩区,此区同时是 LPG 发动机主要工况区;由图 2(b)可知,CO 高排放区也是 LPG 发动机主要工况区;由图 2(c)可知,LPG 发动机主要工况区大部分处于低 NO 排放区,部分处于中高 NO 排放区。通过以上对该 LPG 发动机排放性的分析可知:在广州市实际道路工况下,该 LPG 发动机主要工作在 HC、CO 高排放区,将导致其累计排放量较高。

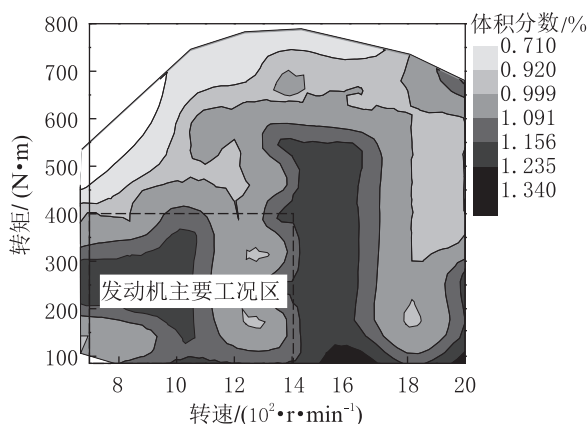
2 LPG 发动机主要排放控制参数优化

根据发动机原理,工况一定时,过量空气系数 $\phi_a$ 和点火提前角 $\theta_{\text{ig}}$ 是对点燃式发动机排放性影响最重要的两个控制参数<sup>[5]</sup>,通过合理优化 $\phi_a$ 和 $\theta_{\text{ig}}$ 可有效改善 LPG 发动机主要工况区的排放性。而 $\phi_a$ 和 $\theta_{\text{ig}}$ 的优化是一个多目标寻优的过程,基于传统发动机台架试验和汽车路试的发动机控制参数优化方法,存在效率低、成本高等问题<sup>[6]</sup>。通过 DoE 进行合理样本试验,快速建立发动机统计学数学模型,并结合优化算法可有效提高发动机控制参数优化效率<sup>[7]</sup>。

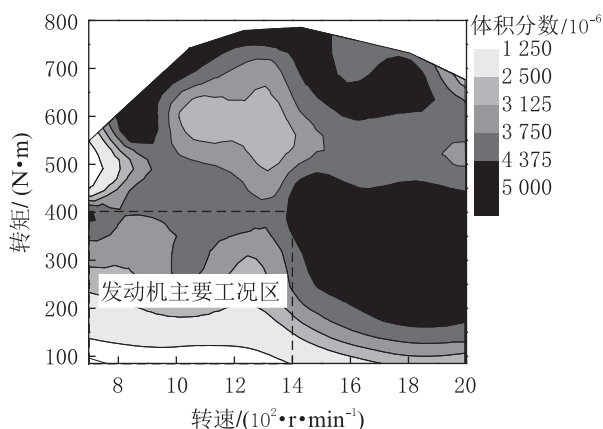
为确保建立的发动机统计学数学模型的可靠性,需要大量样本试验数据,利用发动机一维仿真模型可以快速可靠地获取样本试验数据<sup>[8-9]</sup>。对于发动机统计学数学模型的参数多目标优化问题,遗传算法作为一种全局优化概率算法,被广泛应用<sup>[10]</sup>。由此,本文通过 DoE,利用发动机一维仿真模型获取样本试验数据,建立 LPG 发动机统计学数学模型,并结合遗传算法对排放控制参数 $\phi_a$ 和 $\theta_{\text{ig}}$ 进行优化,流程如图 3 所示。



(a) HC排放特性



(b) CO排放特性



(c) NO排放特性

图2 LPG发动机排放特性图

## 2.1 DoE 样本选取

针对 LPG 发动机主要工况区  $\phi_a$  和  $\theta_{ig}$  进行优化,列出各试验参数范围,如表 2 所示。

本文拟选用神经网络建立 LPG 发动机统计学数学模型,根据神经网络模型的均方根误差随样本数的变化关系,选择安排 2 500 次试验,其中包含 250 次检验样本数据。

试验样本数量确定后,试验样本分布是 DoE 的

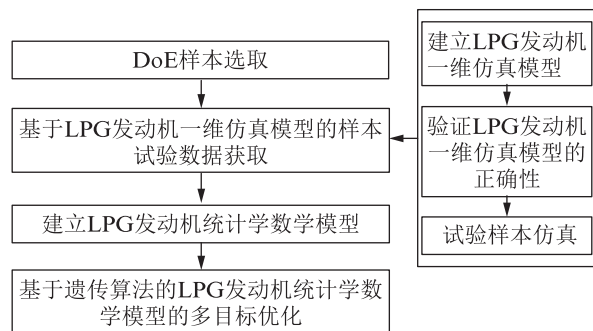


图3 LPG 发动机  $\phi_a$  和  $\theta_{ig}$  优化流程

表 2 各试验参数范围

| 项目   | 最小值                       | 最大值       |
|------|---------------------------|-----------|
| 工况参数 | 转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 700 1 400 |
|      | 节气门开度/%                   | 10 50     |
| 控制参数 | 点火提前角/(°)                 | 6 35      |
|      | 过量空气系数                    | 0.8 1.5   |

核心。拉丁超立方体抽样方法可得到较好的采样点分布,可有效地用采样值反映随机变量的整体分布<sup>[9]</sup>,因此本文通过拉丁超立方体抽样方法获取  $\phi_a$  和  $\theta_{ig}$  试验样本点。

## 2.2 样本试验数据获取

利用 LPG 发动机一维仿真模型对试验样本进行仿真试验,可高效地获取样本试验数据。根据 LPG 发动机基本结构参数,通过 GT-Power 软件建立 LPG 发动机一维仿真模型,主要包括进排气系统模块、LPG 发动机气缸模块、曲轴箱模块、LPG 燃料喷射阀模块等。

为保证 LPG 发动机一维仿真模型能够提供可靠样本试验数据,利用台架试验数据对该模型进行了多工况的准确性验证。

图 4、图 5 分别为不同节气门开度下,发动机转速分别为 800 r/min 和 1 200 r/min 时 LPG 发动机输出转矩、三种主要排放的仿真值与试验值的对比。结果表明:LPG 发动机输出转矩及 HC、NO、CO 排放仿真值与试验值最大偏差率分别为 5.0%、4.2%、4.8%和 2.4%,模型的性能参数偏差均在合理范围之内<sup>[9]</sup>。

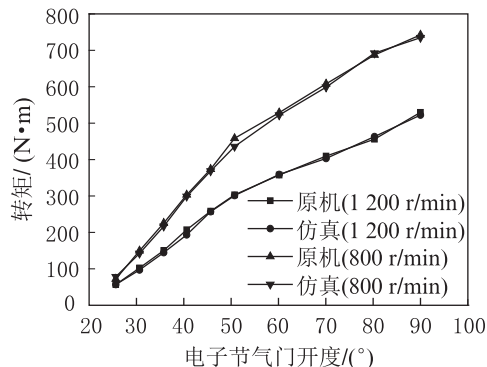


图4 不同节气门开度下 LPG 发动机转矩仿真与试验对比

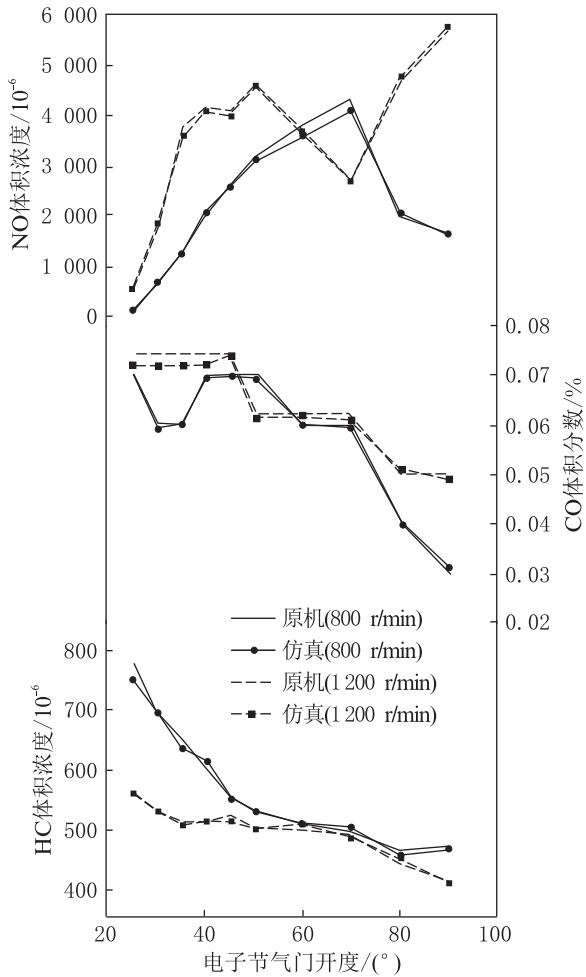


图5 不同节气门开度下LPG发动机排放仿真与试验对比

将试验样本点数据导入LPG发动机一维模型进行仿真试验,获得样本试验数据,包括LPG发动机输出转矩、进气歧管压力及三种主要排放物的排放量。

### 2.3 LPG发动机统计学数学模型的建立

利用样本试验数据建立发动机统计学数学模型的方法较多<sup>[7]</sup>,其中神经网络理论上能以任意精度逼近任意非线性函数,适合用于建立非线性较强的LPG发动机模型。

利用神经网络建立LPG发动机统计学数学模型;输入参数为进气歧管压力、转速、点火提前角和过量空气系数;输出参数为转矩及NO、CO、HC排放量。

通过样本试验数据对神经网络模型训练完成后,利用检验数据对神经网络模型精度进行检验,通常采用检测值与神经网络模型预测值的线性回归相关系数 $R$ 来评价模型的精度<sup>[11]</sup>。

$$R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{X_{\text{ANN}}(i) - X_{\text{expected}}(i)}{X_{\text{expected}}(i)} \right| \quad (1)$$

式中, $N$ 为检测值个数; $X_{\text{ANN}}$ 为神经网络模型预测

值; $X_{\text{expected}}$ 为检测值。

图6为LPG发动机神经网络模型预测精度线性回归分析,该神经网络模型对于转矩及CO、NO、HC排放的预测值与测试值的 $R$ 值分别为0.99579、0.99568、0.99497和0.95052,表明该神经网络模型具有较高的精度<sup>[12]</sup>,能够对LPG发动机进行快速性能预测。

### 2.4 基于遗传算法的LPG发动机 $\phi_a$ 和 $\theta_{ig}$ 优化

LPG发动机神经网络模型是一种非线性模型,而遗传算法具有以面为单位的搜索方法,适合非线性模型的参数优化问题。本文的优化目标是减少LPG发动机主要工况区内的污染物排放量,同时保证其动力性,即通过寻找最优 $\phi_a$ 和 $\theta_{ig}$ 使LPG发动机主要工况区内,在满足排放限值的条件下达到较高的输出转矩。利用遗传算法进行LPG发动机 $\phi_a$ 和 $\theta_{ig}$ 优化,方案表示如下。

最大化:

$$T_{\text{tq-max}} = \max(T_{\text{tq}}(x)) \quad (2)$$

约束条件:

$$\begin{aligned} f_{\text{HC}}(x) &\leq L_{\text{HC}} \\ f_{\text{NO}}(x) &\leq L_{\text{NO}} \\ f_{\text{CO}}(x) &\leq L_{\text{CO}} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $x$ 为优化向量, $x = (\theta_{ig}, \phi_a)$ ;  $T_{\text{tq-max}}$ 为发动机最大转矩; $T_{\text{tq}}$ 为发动机转矩,是遗传算法的目标函数; $f_{\text{HC}}$ 、 $f_{\text{NO}}$ 、 $f_{\text{CO}}$ 分别为HC、NO、CO排放量; $L_{\text{HC}}$ 、 $L_{\text{NO}}$ 、 $L_{\text{CO}}$ 分别为欧Ⅲ标准HC、NO、CO排放限值。

对于有约束条件的遗传算法优化问题需要对约束条件进行处理,将有约束优化转化为无约束优化,相应的无约束优化的目标函数即是有约束优化问题的遗传算法适应度函数<sup>[10]</sup>。约束优化问题的适应度函数主要包括静态罚函数和动态罚函数方法,其中静态罚函数方法应用较为广泛。

为避免遗传算法优化过程中偏向于某个约束条件,同时为了减少罚函数个数,将所有的约束条件进行归一化处理并应用相同的罚参数 $k$ ,即为:

$$\begin{aligned} g_1(x) &= f_{\text{HC}}(x)/L_{\text{HC}} - 1 \leq 0 \\ g_2(x) &= f_{\text{NO}}(x)/L_{\text{NO}} - 1 \leq 0 \\ g_3(x) &= f_{\text{CO}}(x)/L_{\text{CO}} - 1 \leq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

由此,遗传算法优化的适应度函数可以表示为:

$$F(x) = T_{\text{tq}}(x) + k \sum_{i=1}^3 \max(g_i(x), 0) \quad (5)$$

式中, $F(x)$ 为适应度函数。

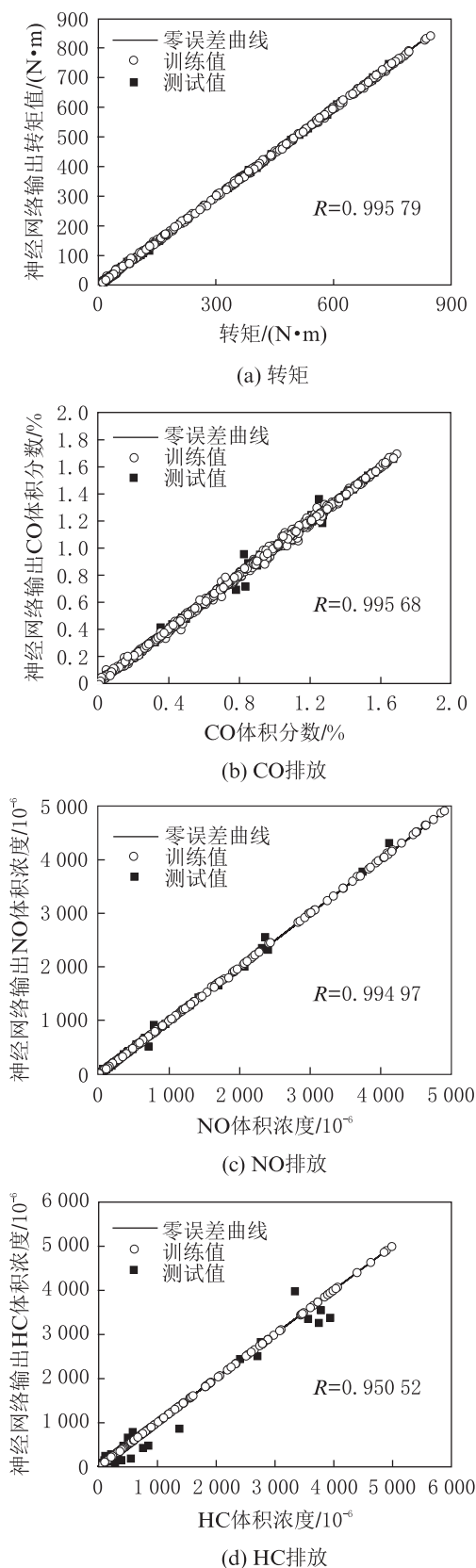


图6 LPG 发动机神经网络模型预测精度分析

罚函数  $k$  的选择对遗传算法的优化性能十分重要,通常采用一定的试验进行确定<sup>[10]</sup>,本文中选定  $k$  值为 100。

将遗传算法优化程序与 LPG 发动机神经网络模型进行耦合求解运算,得到优化后的 LPG 发动机  $\phi_a$  和  $\theta_{ig}$ ,如图 7、图 8 所示。

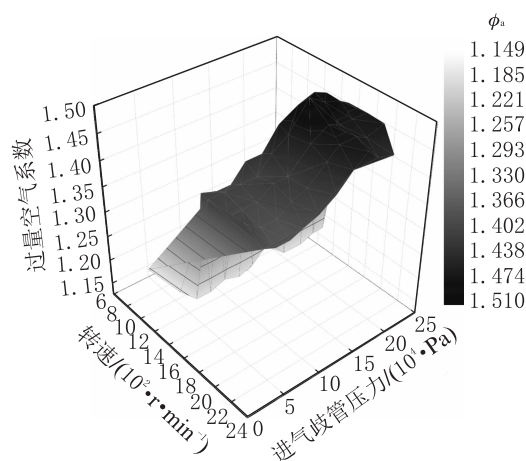


图7 优化后的  $\phi_a$

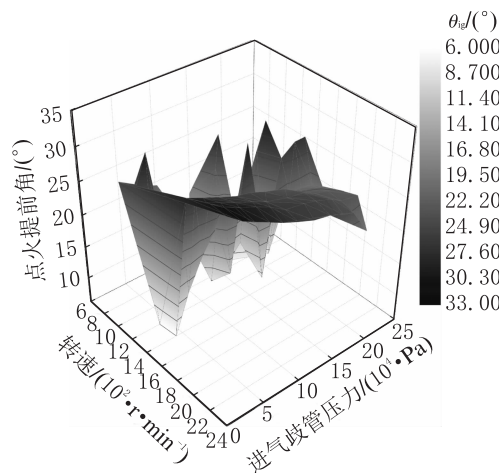


图8 优化后的  $\theta_{ig}$

### 3 $\phi_a$ 和 $\theta_{ig}$ 优化前后 LPG 发动机排放性对比

为合理对比分析  $\phi_a$  和  $\theta_{ig}$  优化前后 LPG 发动机排放性,将优化前后的  $\phi_a$  和  $\theta_{ig}$  数据分别输入到前文中建立的 LPG 发动机一维仿真模型中,进行广州市典型道路工况下的排放性仿真试验。

#### 3.1 广州市典型道路工况选取

选取 QC/T 759—2006 中城市客车用运转循环(普通道路)工况<sup>[13]</sup>作为 LPG 发动机排放性测试循环工况,该工况是根据北京、上海和广州的实际道路行驶工况数据制定的,对广州市实际道路工况具有一定的代表性。

根据测试循环工况,由发动机转速与车速之间的关系及汽车行驶方程<sup>[14]</sup>,结合 LPG 公交客车(型号 GZ611SV1)整车参数及 LPG 公交客车参考换挡点车速(如表 3 所示),计算得到 LPG 公交客车运行

在该测试循环下发动机工况变化。

表 3 LPG 公交客车参考换挡点车速

| 项目                       | 参数 |    |    |    |
|--------------------------|----|----|----|----|
| 挡位                       | 2  | 3  | 4  | 5  |
| 车速/(km·h <sup>-1</sup> ) | 15 | 35 | 45 | 55 |

3.2  $\phi_a$  和  $\theta_{ig}$  优化前后 LPG 发动机排放性对比

将 LPG 发动机的工况数据、 $\phi_a$  和  $\theta_{ig}$  优化前后数据导入 LPG 发动机一维仿真模型中进行仿真,得到 LPG 发动机在测试工况下的累计排放量对比及输出转矩对比,如图 9、图 10 所示。

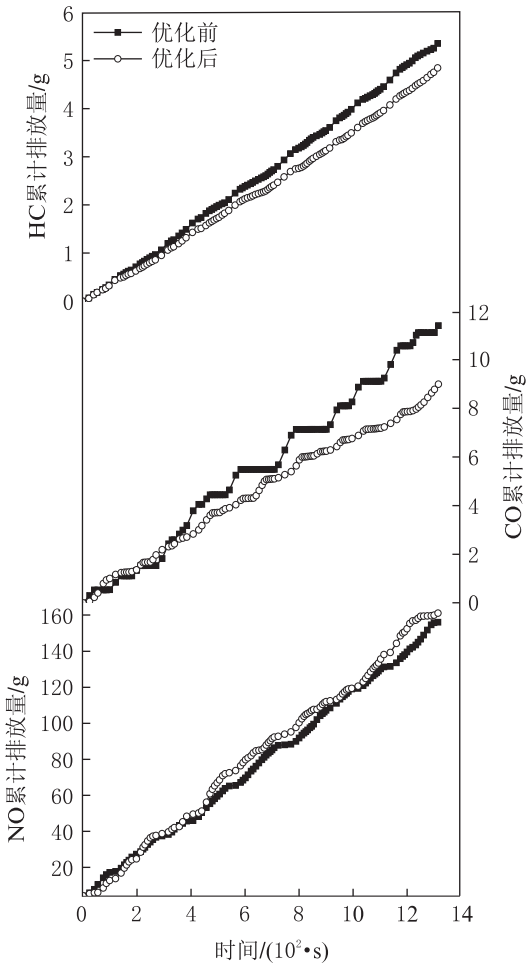


图 9 优化前后 LPG 发动机排放性对比

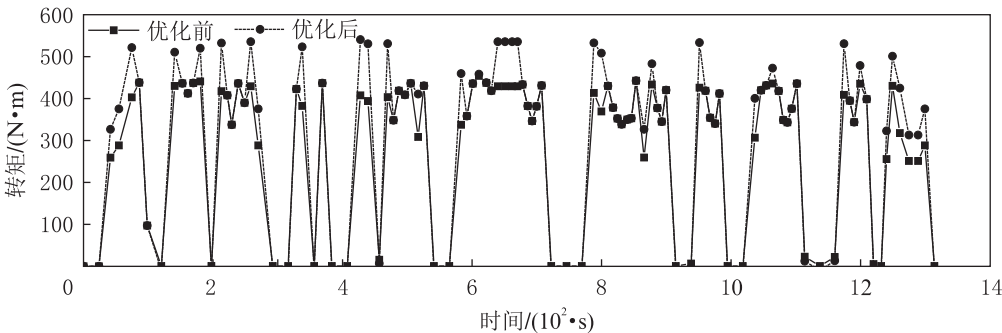


图 10 优化前后 LPG 发动机输出转矩对比曲线图

由图 9、图 10 可知,在测试循环工况下,该 LPG 发动机在  $\phi_a$  和  $\theta_{ig}$  优化后,HC、CO 累计排放量分别减少 9.5%、21.0%,NO 累计排放量较优化前略有增加(2.7%),输出转矩明显提高,最大增加 22.6%。

通过以上对  $\phi_a$  和  $\theta_{ig}$  优化前后 LPG 发动机在测试循环工况下的性能仿真对比可知: $\phi_a$  和  $\theta_{ig}$  优化后 LPG 发动机 HC、CO 累计排放量减少,但 NO 累计排放量有所增加,同时 LPG 发动机输出转矩有一定幅度的提高。

4 结论

(1) 基于 ETC 循环工况排放认证的 LPG 发动机在广州市实际工况下运行时,LPG 发动机主要工作在 HC、CO 高排放工况区,会导致 LPG 公交客车污染物累计排放量的增加。

(2) 通过 DoE,由 LPG 发动机一维仿真模型提供样本试验数据建立 LPG 发动机统计学数学模型,并结合遗传算法对 LPG 发动机控制参数优化的方法,可有效地提高 LPG 发动机控制参数的优化效率。

(3) 在广州市典型道路工况下, $\phi_a$  和  $\theta_{ig}$  优化后的 LPG 发动机,HC、CO 累计排放量分别减少 9.5%、21.0%,转矩最大增加 22.6%,但 NO 累计排放量增加 2.7%。

参考文献:

[1] 支数模. 汽车排放污染物控制与零排放净化技术[M]. 北京:中国质检出版社中国标准出版社,2012:5-11.

[2] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局. 车用压燃式、气体燃料点燃式发动机与汽车排气污染物排放限值及测量方法(中国Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ阶段):GB 17691—2005[S]. 北京:中国环境出版社,2005.

[3] 彭美春,林权臻,梁晓峰,等. 广州市公交车行驶工况与 ETC 城市工况的比较[J]. 汽车工程,2012,34(11):1043-1048.

PENG M C, LIN Q Z, LIANG X F, et al. Comparison between the driving mode of city buses in Guangzhou city and the urban part of ETC circle[J]. Automotive Engineering, 2012,34(11):1043-1048.

- [4] 高继东,秦孔建,梁荣亮,等.实际道路工况和法规工况下中型柴油机排放特性的对比分析[J].吉林大学学报(工学版),2012,42(1):33-38.
- GAO J D, QIN K J, LIANG R L, et al. Comparative analysis of medium-duty diesel engine emissions under BJCBC and ETC [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2012, 42(1): 33-38.
- [5] 王建昕,帅石金.汽车发动机原理[M].北京:清华大学出版社,2011.
- [6] 袁荣棣.基于模型的压缩天然气发动机电控关键技术研究[D].重庆:重庆大学,2012.
- [7] 沈国华,任向飞,李进普,等. DOE 在发动机性能标定中的应用研究[J]. 内燃机工程, 2014, 35(4): 85-90.
- SHEN G H, REN X F, LI J P, et al. Application of DOE in engine performance calibration process [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2014, 35(4): 85-90.
- [8] ZHAO J X, XU M, LI M, et al. Design and optimization of an Atkinson cycle engine with the artificial neural network method [J]. Applied Energy, 2012, 92: 492-502.
- [9] 韩恺,吴滔滔,赵长禄,等. 基于 DOE 和神经网络的增压柴油机实时模型建模方法研究[J]. 内燃机工程, 2014, 35(1): 57-62.
- HAN K, WU T T, ZHAO C L, et al. Development of real-time capable turbocharged diesel engine model based on DOE and neural network [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2014, 35(1): 57-62.
- [10] 王森,赵金星,刘双寨,等. 基于神经网络和遗传算法的 Atkinson 循环发动机几何压缩比优化[J]. 内燃机学报, 2015, 33(4): 370-377.
- WANG S, ZHAO J X, LIU S Z, et al. Optimization of geometrical compression ratio for an Atkinson cycle engine based on artificial neural network and genetic algorithm [J]. Transactions of CSICE, 2015, 33(4): 370-377.
- [11] ALONSO J M, ALVARRUIZ F, DESANTES J M, et al. Combining neural networks and genetic algorithms to predict and reduce diesel engine emissions[J]. Transactions on Evolutionary Computation, 2007, 11(1): 46-55.
- [12] ADEWOLE B Z, ABIDAKUN O A, et al. Artificial neural network prediction of exhaust emissions and flame temperature in LPG (liquefied petroleum gas) fueled low swirl burner[J]. Energy, 2013, 61: 606-611.
- [13] 国家发展和改革委员会. 汽车试验用城市运转循环: QC/T 759—2006[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
- [14] 余志生. 汽车理论[M]. 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2009.