

# 摩托车循环工况排放试验测试与仿真模拟

尚会超<sup>1</sup>, 张力<sup>1</sup>, 陈春望<sup>2</sup>, 黄永生<sup>3</sup>

(1. 重庆大学机械工程学院, 重庆 400030;

2. 重庆建设摩托车股份有限公司, 重庆 400050;

3. 装甲兵技术学院车辆工程系, 长春 130117)

**摘要:** 对建设 125mL 摩托车进行国Ⅲ排放测试, 通过提高化油器精度, 设计二次补气结合两级催化转化器的排放后处理系统, 最终使摩托车的排放完全达到国Ⅲ标准。通过对催化转化装置催化反应机理的研究, 建立催化反应模型, 对其进行数值求解, 结果与试验值吻合较好, 验证了模型的正确性。在此基础上, 利用 Boost 软件建立汽油发动机循环仿真模型, 对整车的稳态工况和市区运行循环进行仿真模拟。

**关键词:** 摩托车排放; 催化转化器; 整车试验

**中图分类号:** TK411

## Experimental Test and Simulation of Motorcycle Emission on Driving Cycles

SHANG Huichao<sup>1</sup>, ZHANG Li<sup>1</sup>, CHEN Chunwang<sup>2</sup>, HUANG Yongsheng<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030;

2. Chongqing Jianshe Motorcycle Company Limited, Chongqing 400050;

3. Department of Vehicle Engineering, Institute of Armored Technique, Changchun 130117)

**Abstract:** National stage III emission test was carried out on a type of Jianshe 125mL motorcycle, which was improved by using the precise carburetor and designing the post-treatment of exhaust gas combining the secondary air injection with two levels of catalytic converter. The test results showed that with these technologies, the national stage III emission standards are met. Model of catalytic chemical reaction was set up with the research of catalytic reaction mechanism. The results from numerical calculations had good agreement with experimental data. On that basis, the cycle simulation model of a gasoline engine was established by using Boost software, which was used to simulate the steady-state condition and the UDC condition of the motorcycle.

**Key words:** Motorcycle emission; Catalytic converter; Vehicle test

## 0 引言

从 2008 年 7 月 1 日开始摩托车第Ⅲ阶段排放标准的型式认证, 并于 2010 年 7 月 1 日和 2011 年 7 月 1 日起分别实施两轮和三轮摩托车排放一致性检查<sup>[1]</sup>。为达到排放标准, 摩托车厂家进行了各种控制排放技术的开发。二次空气系统在汽油机上早就得到应用, 并使发动机排放问题得到很大改善<sup>[2]</sup>。同时, 三效催化转化技术是摩托车尾气排放控制的最有效方法<sup>[3][4]</sup>。大量的研究表明<sup>[5]</sup>, 通过改进型化油器加上二次空气装置及双级催化器, 有可能使排量<150mL 的摩托车达到欧Ⅲ标准。

本文介绍在 JS125-28B 摩托车上应用两级催化转化器, 同时, 通过提高化油器精度和加装二次空气装置, 最终使其达到国Ⅲ标准。在试验的基础上对其催化转化器的起燃特性和空燃比特性进行数值模拟, 并对整车的稳态工况和循环工况排放进行仿真模拟。

**基金项目:** 国防基础科研项目 (C1020060350); 重庆市科技攻关资助项目 (CSTC, 2008AC6024)

**通信联系人:** 张力 (1968—), 男, 教授, 主要研究方向为内燃机燃烧测试与排放控制等. E-mail: zhangli20@cqu.edu.cn

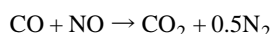
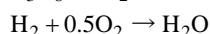
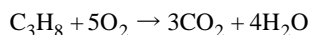
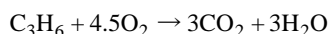
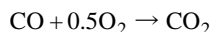
**作者简介:** 尚会超 (1986—), 男, 硕士, 主要研究方向为内燃机排放控制

## 1 催化器活性评价及仿真模拟

### 1.1 催化器反应模型

在 BOOST 软件中建立催化转化器模型, 对其进行起燃特性和空燃比特性的仿真模拟。要得到准确模拟的一个关键就是要对催化转化器内化学反应的反应机理有正确的描述<sup>[6][7]</sup>。

- 45 在建立模型时, 只考虑了 CO、C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>、C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>、NO、H<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 六种气体在催化剂内部发生的化学反应, 归结为以下五个反应:



CO、C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>、C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>、NO、H<sub>2</sub> 的化学反应速率表达式如下:

$$R_{\text{CO}} = \frac{k_1 \cdot y_{\text{CO}} \cdot y_{\text{O}_2}}{G} + \frac{k_4 \cdot y_{\text{NO}}^m \cdot y_{\text{CO}}^n}{S}$$

$$R_{\text{C}_3\text{H}_6} = \frac{k_2 \cdot y_{\text{C}_3\text{H}_6} \cdot y_{\text{O}_2}}{G}$$

$$R_{\text{C}_3\text{H}_8} = \frac{k_3 \cdot y_{\text{C}_3\text{H}_8} \cdot y_{\text{O}_2}}{G}$$

$$R_{\text{NO}} = \frac{k_4 \cdot y_{\text{NO}}^m \cdot y_{\text{CO}}^n}{S}$$

$$R_{\text{H}_2} = \frac{k_5 \cdot y_{\text{H}_2} \cdot y_{\text{O}_2}}{G}$$

$$G = T_s \cdot (1 + K_2 \cdot y_{\text{CO}} + K_3 \cdot y_{\text{HC}})^2 \cdot (1 + K_4 y_{\text{CO}}^2 \cdot y_{\text{HC}}^2) \cdot (1 + K_5 \cdot y_{\text{NO}}^{0.7})$$

$$S = T_s^{-0.17} \cdot (T_s + K_6 \cdot y_{\text{CO}})^2$$

- 50  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 、 $k_4$ 、 $k_5$  为反应速率常数, 可用 Arrhenius 方程表示:

$$k_1 = 4 \times 10^{11} \exp(-11750/T_s)$$

$$k_2 = 1.392 \times 10^{11} \exp(-11900/T_s)$$

$$k_3 = 1.392 \times 10^{11} \exp(-11800/T_s)$$

$$k_4 = 1.5 \times 10^{13} \exp(-9871/T_s)$$

$$k_5 = 3.7037 \times 10^9 \exp(-6000/T_s)$$

$K_i$  为吸附平衡常数, 用下面的计算式:

$$K_2 = 65.5 \exp(961/T_s)$$

$$K_3 = 2080 \exp(361/T_s)$$

$$K_4 = 3.98 \exp(11611/T_s)$$

$$K_5 = 479000 \exp(-3733/T_s)$$

$$K_6 = 120280 \exp(653.5/T_s)$$

### 1.2 起燃特性和空燃比特性仿真模拟及验证

- 55 采用 CES08A 催化器活性测试仪对催化转化器的性能进行评价。催化器活性评价系统如图 1 所示。本设备能够按照预定浓度配置模拟废气, 以及控制试验所需的温度和流量, 完成催化器的“起燃温度特性实验”和“空燃比特性实验”。试验采用  $\Phi 20 \times 20$  (mm), 孔密度为 200CPSI 的金属催化器小样, 贵金属方案为 60g/ft<sup>3</sup>, Pt: Pd: Rh=5:9:2。在进行起燃特性和空

燃比特性测试时,所用配气成分为:CO(4%)、 $C_3H_8 + C_3H_6$ (400ppm)、NO(300ppm)、 $CO_2$ (10%)、 $O_2$ (根据过量空气系数调整)、 $N_2$ 平衡气。

图2为氧平衡系数为0.97时,模拟得到的三种尾气的起燃温度特性与试验结果的对比。从图中可以看出,三种尾气模拟的起燃温度与实测的起燃温度基本吻合,总体趋势是一致的。但模拟得到的CO起燃过程要快于试验测试结果,实测的CO转化率升高过程要慢一些,这可能是由于动力学数据和反应机理的不精确造成的。模拟得到的 $NO_x$ 起燃温度特性与试验结果吻合良好,尤其是在起燃过程中,随着入口气体温度的升高。模拟和实测的 $NO_x$ 转化率曲线基本一致,只是当达到最高转化率时,模拟值和试验值有一些偏差。模拟HC的起燃温度特性与试验一致,最高转化率接近。但模拟值在290℃时转化率急剧升高,而试验得到的转化率升高趋势比较缓慢。由于实际上HC氧化的中间产物比较多,反应机理很复杂,而模型中反应机理的反应数目是有限的,只考虑了有限数目的表面物质反应,所以出现偏差。

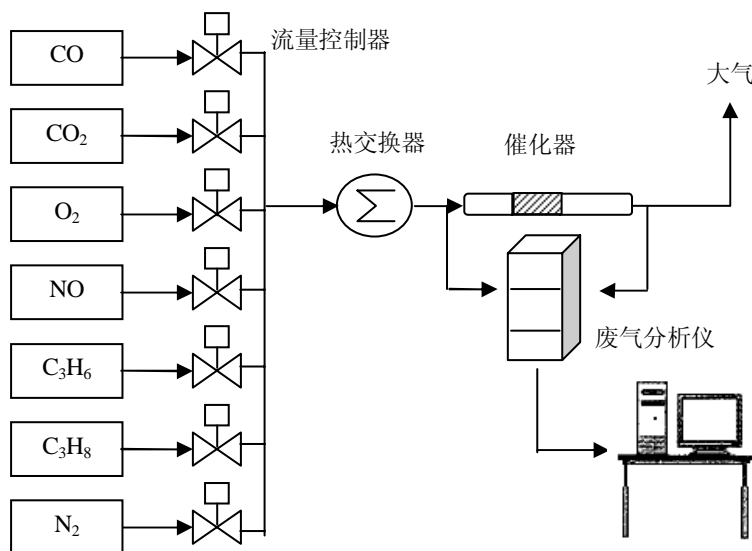


图1 催化剂活性评价系统  
Fig. 1 Catalyst activity test system

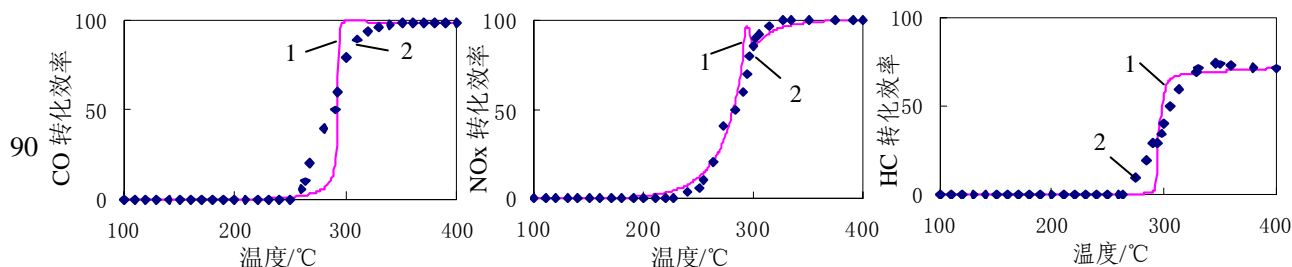


图2 起燃温度特性模拟值与试验值对比

Fig. 2 The simulation value and experimental values of Light-off temperature characteristic

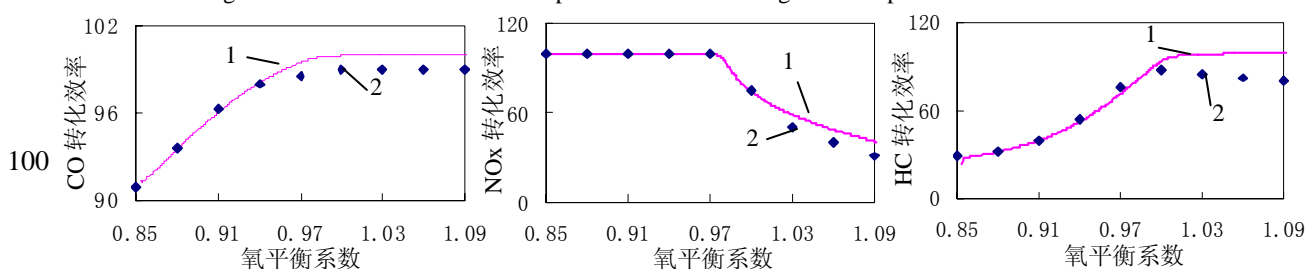


图3 空燃比特性模拟值与试验值对比

Fig. 3 The simulation value and experimental value of air-fuel ratio characteristic

图 3 为催化剂小样的空燃比特性试验值与模拟值的对比,它直观的反应了三种尾气的转化率随氧平衡浓度变化的趋势。CO 在氧平衡系数  $\beta < 1$  时,模拟值和试验值完全重合。当氧平衡系数  $\beta > 1$  时,模拟值稍高于试验值,主要是由于动力学数据不精确造成的。当氧平衡系数  $\beta$  接近 1 时,NO<sub>x</sub> 的转化率急剧下降,主要是由于 O<sub>2</sub> 充足,促进了 CO 和 O<sub>2</sub> 的反应,抑制了 NO<sub>x</sub> 的还原,从而使 NO<sub>x</sub> 转化率下降。NO<sub>x</sub> 转化效率模拟值和试验值基本吻合,当氧平衡系数  $\beta > 1$  时,模拟值稍高于试验值。HC 的模拟转化率随着氧平衡系数的增大而不断增加,主要是由于 O<sub>2</sub> 增加,促进了 HC 的氧化反应。当氧平衡系数  $\beta > 1$  时,模拟转化率接近 1,大于试验值,主要是由于 HC 氧化模型的不精确造成的。

## 2 发动机稳态工况排放测试与仿真模拟

### 2.1 稳态工况排放测试

试验中所采用的摩托车型号为 JS125-28B,为便于测量排放物,消声器采用已改装好的消声器。试验方案为测试稳态工况不同挡位不同转速点下的 CO、NO<sub>x</sub>、HC 的含量。所用尾气分析仪器为 AVL DIGAS 4000 Light 五组份汽车排气分析仪。通过底盘测功机来实现对整车不同车速的控制,试验过程中所选取的稳态车速如表中所示,分别为一挡/15Km/h、二挡/20Km/h、二挡/32Km/h、三挡/35Km/h、五挡/40Km/h。

为达到国III排放标准,采用二次补气加两级三效催化转化器的技术方案。试验中分别对补气和不补气两种状态下第一级催化转化器前后的 CO、NO<sub>x</sub>、HC 的含量进行了测量,测试结果如表中所示。从试验结果中可以看出,由于混合气偏浓,无补气时排气中 O<sub>2</sub> 含量少,第一级催化器对 CO 和 HC 的转化效率很低;当加入二次补气装置后,排气中 O<sub>2</sub> 含量增加,从而使得 CO 和 HC 的转化效率升高。

### 2.2 稳态工况排放仿真

利用发动机循环模拟软件 Boost 建立 JS125-28B 发动机缸内准维燃烧模型,模拟缸内排放物的生成,同时利用 Boost 软件的瞬态模拟功能来模拟整车的稳态工况,并在此模型中耦合前一部分所建立的三效催化转化器模型进行模拟,图 4 所示为所建立的无补气时发动机模型。整车在稳态工况不同挡位不同转速点下,第一级催化转化器前后排放物的模拟结果如表中所示,从表中可以看出,催化器前后 CO、NO<sub>x</sub>、HC 含量的模拟值和试验值有一定的偏差,可能是由于准维燃烧模型和三效催化转化器模型不精确导致。但是模拟结果中三效催化转化器对排放物转化效率的趋势是一致的,即在无二次补气时 CO 和 HC 的转化效率低,添加二次补气后,CO 和 HC 转化率升高,和试验结果是吻合的。

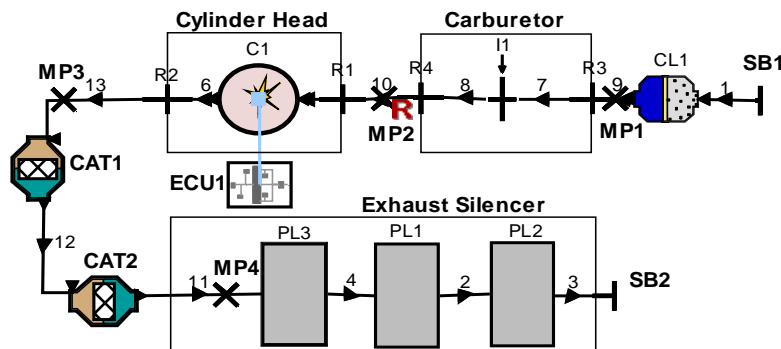


图 4 发动机计算模型  
Fig. 4 Engine simulation model

表 1 第一级催化器前后 CO 采集值  
Tab. 1 The front and back collection value of CO in the first catalyst

挡位	车速 Km/h	无二次补气				二次补气			
		试验催 化器前	试验催 化器后	模拟催 化器前	模拟催 化器后	试验催 化器前	试验催 化器后	模拟催 化器前	模拟催 化器后
一	15	4.52	4.15	4.06	4.03	2.92	1.8	3.81	2.18
二	20	4.03	3.99	3.9	3.88	3.01	1.36	3.77	1.85
二	32	3.85	3.87	3.96	3.92	3.39	2.07	3.82	1.75
三	35	3.39	3.21	3.83	3.79	3.44	1.72	3.71	2.27
五	40	3.94	3.98	4.27	4.23	3.7	1.94	3.98	2.67

表 2 第一级催化器前后 NOx 采集值  
Tab. 2 The front and back collection value of NOx in the first catalyst

挡位	车速 Km/h	无二次补气				二次补气			
		试验催 化器前	试验催 化器后	模拟催 化器前	模拟催 化器后	试验催 化器前	试验催 化器后	模拟催 化器前	模拟催 化器后
一	15	103	34	70.7	3	65	28	67.8	1.71
二	20	119	40	118	4.33	68	24	105	1.89
二	32	164	76	249	25.3	143	47	210	20
三	35	257	167	276	16.9	199	63	226	6.5
五	40	322	173	341	17.6	340	95	320	32

表 3 第一级催化器前后 HC 采集值  
Tab. 3 The front and back collection value of HC in the first catalyst

挡位	车速 Km/h	无二次补气				二次补气			
		试验催 化器前	试验催 化器后	模拟催 化器前	模拟催 化器后	试验催 化器前	试验催 化器后	模拟催 化器前	模拟催 化器后
一	15	155	179	178	177	98	65	169	140
二	20	165	168	200	200	100	61	190	128
二	32	119	129	150	150	132	91	142	85
三	35	136	144	163	163	137	101	157	124
五	40	155	214	228	228	126	110	205	152

### 3 整车循环工况排放测试与仿真模拟

将摩托车放置于带有负荷和惯量模拟的底盘测功机上,采用 GB 14622-2007 所规定的方法进行测量,整个测试系统如图 5 所示。由于试验车型所用发动机排量小于 150 mL,所以整个运行循环由六个市区运行循环(UDC)组成。

试验过程中,利用定容取样系统 CVS-7100 稀释尾气样气,并按一定的比例将稀释后的样气收集到采样气袋中,随后用 MEXA-7400D 分析仪系统分析测量采用气袋中各种污染物的浓度,在乘以定容采样系统中流过的稀释排气的总量,并分别除以测试循环的总行驶距离后得到比排放量(g/km)。

在整个测试过程中,分别进行了单线直采和稀释袋采两种采样方式。直采中,对无二次补气和有二次补气两种情况进行了测试,无二次补气时,对第一级催化器前后的 CO、NOx 和 HC 的含量进行了测量,测试结果如图 6 所示;增加二次补气后,分别对第一级催化器前后和二级催化器后的 CO、NOx、HC 的含量进行了测量,测试结果如图 7 所示。表 4 所示为 UDC 运行循环下定容采样测试结果,从测试结果中可以看出,采用二次补气加两级三效催化转化器后达到了国Ⅲ排放法规的要求。

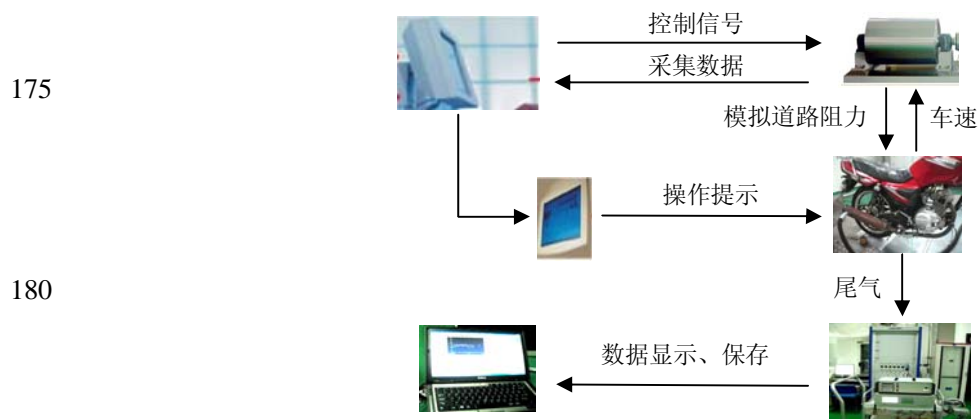
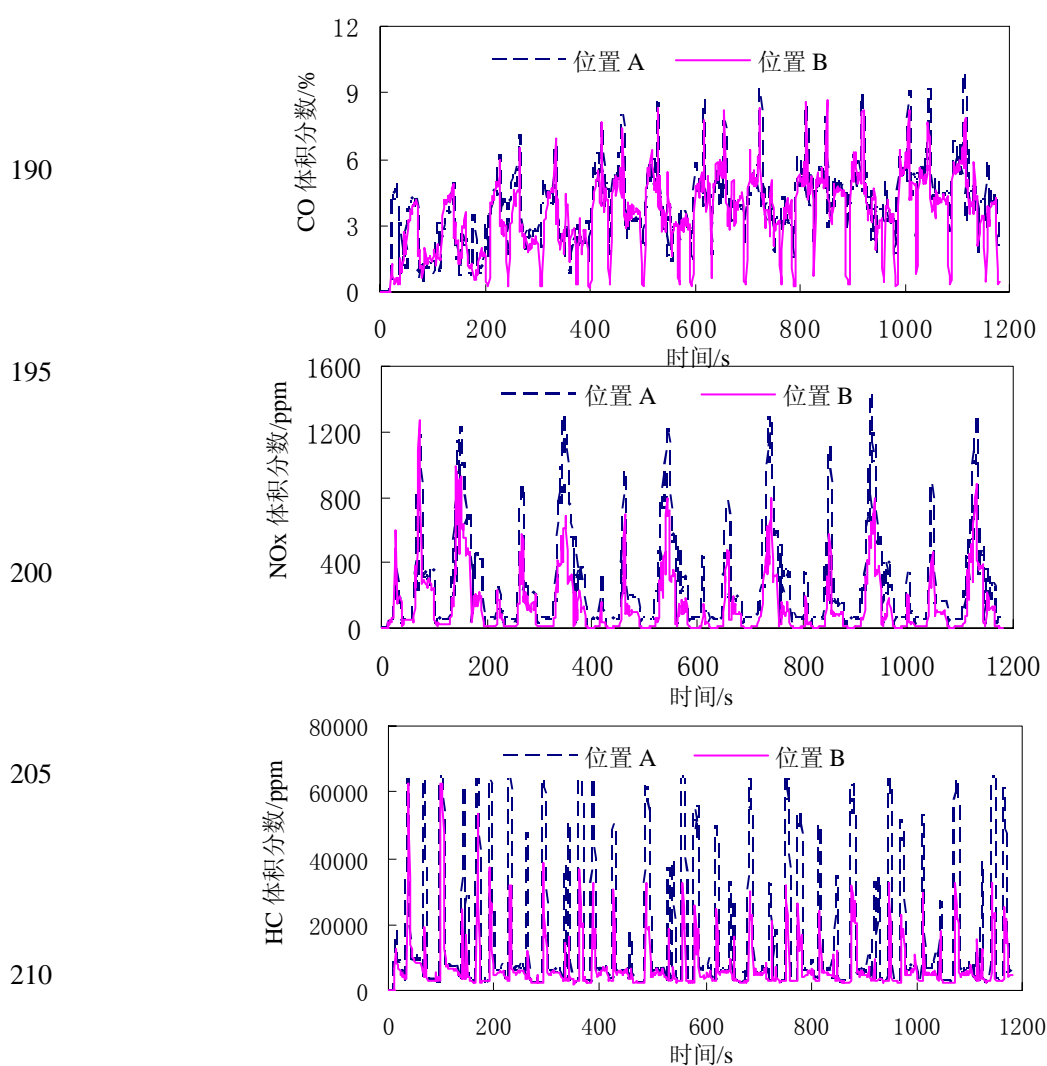


图5 摩托车排放测试系统  
Fig. 5 Motorcycle emissions test system



位置 A: 第一级催化器前 位置 B: 第一级催化器后  
图6 无补气状态下第一级催化器前后排放物测量值

Fig. 6 The front and back emissions value in the first catalyst without the secondary air injection



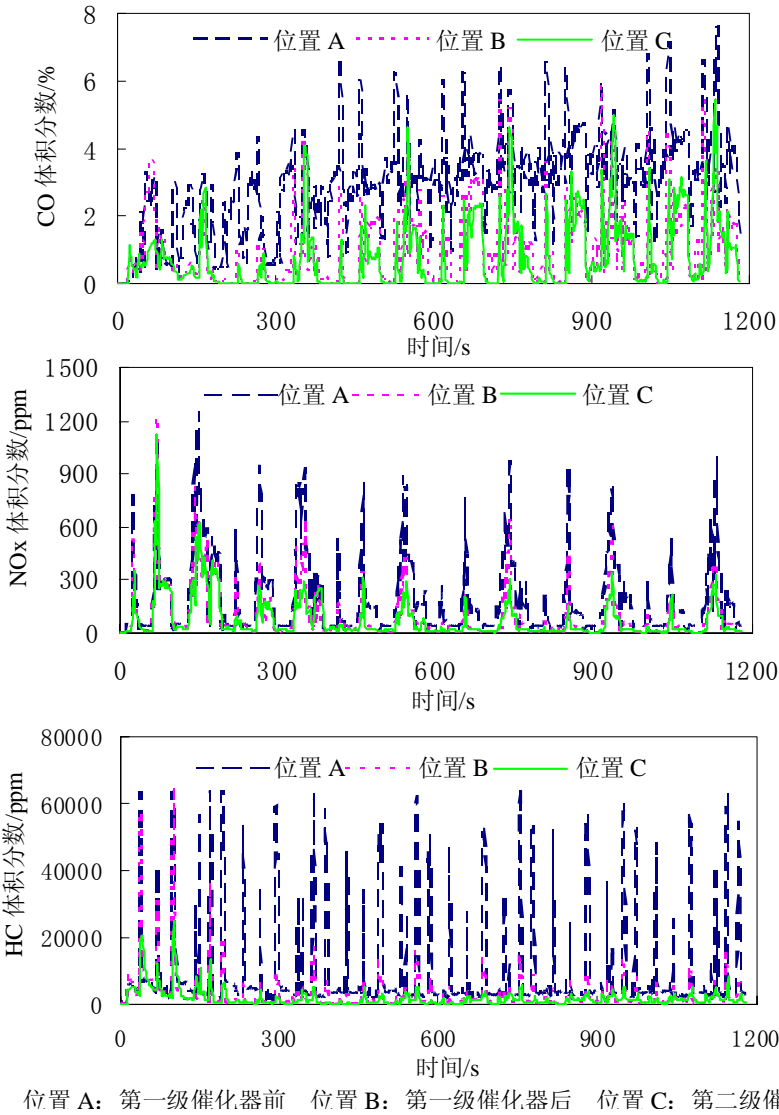


图 7 补气状态下第一级催化器前后和第二级催化器后排放物测量值  
Fig. 7 The front and back emissions value in the first catalyst and the back emissions value in the second catalyst with the secondary air injection

基于前一部分建立的 Boost 模型进行市区运行循环模拟仿真。实际测试循环由六个市区运行循环组成，在模拟计算时，为减少计算量，只计算其中的一个市区运行循环。同时在计算时没有考虑冷启动的影响，即模拟仿真的市区运行循环为热机之后的某个循环。由于单个市区运行循环时间为 195s，行驶里程为 1.013km，所以可以将模拟的单个市区运行循环内 CO、NOx、HC 的累积排放量作为参考，模拟结果如图 8 所示。

从图 8 中可以看出，CO 的累积排放量为 1.885g，与工况法测试的结果 1.924g/km 接近；NO 累积排放量为 0.018g，小于工况测试结果，可能是由于模型中三效催化器对 NO 的转化效率比实际偏高所致，从前一部分的稳态工况模拟计算中也可以看出这点；C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> 的累积排放量为 0.065g，小于工况测试的结果，可能是由于热机之后，HC 排放量降低，同时催化器对其转化率升高所致，从直采数据中可以看出这点，另外 HC 排放物包含种类比较多，C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> 只占其中一部分，所以模拟结果低于测试结果。

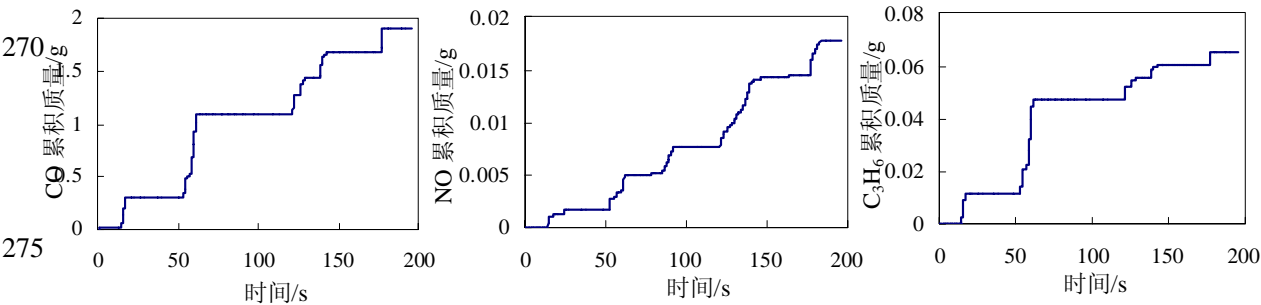


图 8 累积排放量模拟值  
Fig. 8 The simulation value of cumulative emissions

280

表 4 定容采样系统检测结果  
Tab. 4 Constant volume sampling test results

试验类型		CO	THC	NOx	THC + NOx
I 型试验	单位	g/km	g/km	g/km	g/km
	结果	1.924	0.261	0.097	0.358
	限值	2.00	0.80	0.15	0.95
	85%限值	1.700	0.680	0.128	0.808
	70%限值	1.400	0.560	0.105	0.565
	判定	合格	合格	合格	合格

4 结论

通过试验对所用三效催化转化器小样进行起燃特性和空燃比特性评价,在此基础上利用 Boost 软件建立三效催化转化器数值模型,并对其起燃特性和空燃比特性进行模拟,仿真结果与试验结果基本相符,为下一步的模拟计算和试验研究奠定了基础。在底盘测功机上对整车进行不同车速下的稳态工况排放试验,分别测得补气和不补气两种状态下第一级催化器前后的排放物含量,并利用 Boost 软件对其稳态工况进行仿真,模拟污染物含量变化趋势与试验结果一致。对试验车型进行 UDC 工况测试,分别对其使用直采和袋采两种采样方式,定容采样所得结果显示,该车达到了国III排放法规的要求。利用 Boost 软件对单个市区运行循环仿真模拟,所得 CO 累积排放量与试验结果接近,可对试验提供一定的辅助研究。

290

[参考文献] (References)

[1] 侯献军,潘洪健,彭辅明.等. 满足摩托车国III排放标准的净化技术研究[J]. 汽车科技, 2010 (4) : 11-14.  
[2] 吴峰,马成杰,张峰. 应用二次空气结合催化转化器减轻摩托车发动机排放的试验研究[J]. 内燃机工程, 2004, 25 (3) : 64-67.  
[3] 胡春明,赵明,王海蓉.等. 满足欧III排放标准的摩托车用三效催化剂[J]. 催化学报, 2008, 29 (8) : 677-679.  
[4] 张振强,桓源峰,贺小昆.等. 摩托车尾气排放后处理技术[J]. 工业催化, 2008, 16 (7) : 1-6.  
[5] 杨延相,张平,郝大光.等. FAI 燃油喷射技术应对摩托车国III放标准的研究[J]. 内燃机学报, 2009, 27 (1) : 62-67.  
[6] Shamim T, Shen H, Sengupta S. Comparison of Chemical Kinetic Mechanisms in Simulating the Emission Characteristics of Catalytic Converter [C] SAE 2000-01-1953, 2000.  
[7] Braun J, Hauber T, Tobben H, et al. Influence of Physical and Chemical Parameters on the Conversion Rate of a Catalytic Converter: A Numerical Simulation Study [C] SAE 2000- 01-0211, 2000.

300