

文章编号:1671-6833(2014)02-0116-04

# 柴油车碳平衡油耗计算模型的修正

阎汝真<sup>1</sup>, 陈振斌<sup>1</sup>, 何金戈<sup>1</sup>, 肖明伟<sup>1</sup>, 陈迅晓<sup>2</sup>

(1. 海南大学 机电工程学院, 海南 海口 570228; 2. 海南热带汽车试验有限公司, 海南 琼海 571400)

**摘要:** 在分析各国碳平衡油耗计算模型的基础上, 考虑到柴油车尾气中含有一定比例的碳烟, 而碳烟的影响会使碳平衡油耗试验的计算结果产生误差, 针对我国柴油车碳平衡燃油消耗计算模型进行了修正. 通过汽车等速行驶工况试验验证结果显示, 修正前、后的碳平衡油耗计算值相对于实测值的误差均在 4% 以内, 修正后的误差更低. 绘制修正后的数据拟合曲线并且验证其线性显著性, 结果表明具有特别显著的线性关系. 由此可见, 修正后的碳平衡油耗计算模型适用于柴油车等速行驶工况油耗检测, 修正后的碳平衡法计算模型考虑到碳烟中碳颗粒对柴油车油耗计算结果的影响, 更加科学合理.

**关键词:** 柴油车; 燃油消耗量; 碳平衡法; 计算模型

**中图分类号:** U461.8      **文献标志码:** A      doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.02.027

## 0 引言

目前, 我国现行的乘用车燃料消耗量试验方法为 GB/T 12545.1—2008<sup>[1]</sup>; 轻型车燃油消耗量试验方法为 GB/T 19233—2008<sup>[2]</sup>, 燃油消耗量测量常用方法有碳平衡法和油耗仪测量法, 对于行驶工况比较复杂的油耗试验国内外通常采用碳平衡法计算油耗量. 碳平衡法是根据质量守恒定律, 汽油(柴油)经过发动机燃烧后, 排气中碳质量总和与燃烧前的燃油中碳质量总和相等. 汽车尾气中碳原子主要存在于二氧化碳、一氧化碳和碳氢化合物中, 目前的碳平衡法计算模型将排气烟度中的碳原子忽略不计, 这样会影响柴油车油耗计算结果的准确性.

## 1 各国基于碳平衡法的柴油车油耗计算模型

美国柴油车油耗计算模型<sup>[3]</sup>

$$MPG = \frac{2\,778}{0.273 \times CO_2 + 0.429 \times CO + 0.866 \times HC} \quad (\text{mile/gallon}). \quad (1)$$

欧盟柴油车油耗计算模型

$FC =$

$$\frac{0.115\,5}{SG \times (0.273 \times CO_2 + 0.429 \times CO + 0.866 \times HC)} \quad (\text{L/100 km}). \quad (2)$$

日本柴油车油耗计算模型<sup>[4]</sup>

$$FE = \frac{735}{0.273 \times CO_2 + 0.429 \times CO + 0.866 \times HC} \quad (\text{km/L}). \quad (3)$$

我国从二十世纪八十年代初就着手制定汽车燃油消耗标准的工作, 发布了测定各类车辆油耗量的统一试验标准, 以及行业性油耗量限值标准.

柴油车:

$$FC = \frac{0.115\,5}{D} [(0.866 \times HC) + (0.429 \times CO) + (0.273 \times CO_2)] \quad (\text{L/100 km}). \quad (4)$$

式中:  $D$  为 288 K (15 °C) 下试验燃料的密度.

综上所述, 国内外的碳平衡法燃油油耗量计算模型都没有考虑到汽车排气污染物 PM (碳烟) 对油耗计算结果的影响.

## 2 针对我国柴油车碳平衡油耗计算模型的修正

### 2.1 柴油车尾气中烟雾排放量的计算

柴油车烟雾(碳烟)排放水平与颗粒体积、流量与浓度有关, 可用消光系数  $K$  值来表征. 在测

收稿日期: 2013-11-26; 修订日期: 2013-12-29

基金项目: 海南省自然科学基金资助项目(512118, 511111)

通讯作者: 陈振斌(1968 年-), 男, 福建建瓯人, 海南大学教授, 主要从事汽车节能减排及生物燃料方面的研究, E-mail: ebin1208@tom.com.

定柴油车单位里程的油耗  $m_f$ 、空燃比  $L$ 、消光系数  $K$  值后,就可以计算出单位车辆的烟雾排放量  $q_v$ .

2.1.1 燃料燃烧前后的分子变化系数的计算

在理想气体状态下,柴油燃烧前后的体积变化系数等同于工质的分子数量变化系数,而车辆尾气排放量与进入气缸的空气量和柴油燃烧前后的体积变化系数有关.

1 kg 柴油燃烧后气态产物的总量为<sup>[5]</sup>

$$M = M_{CO_2} + M_{N_2} + M_{CO} + M_{H_2O} + M_{O_2} + M_C$$
$$= \frac{g_c}{12} + \frac{g_H}{2} + \varphi \frac{g_c}{24} + \alpha L_0 - 0.21 L_0 + \phi \frac{g_c}{12}, \tag{5}$$

式中: $g_c$  为 1 kg 的柴油中 C 的含量,kg; $g_H$  为 1 kg 的柴油中 H 的含量,kg; $\phi$  为 C 元素中以自由碳状态排出的百分比; $\varphi$  为 C 元素中燃烧后转化为 CO 的百分比; $\alpha$  为过量空气系数; $L_0$  为理论空燃比.

由于

$$L_0 = \frac{1}{0.21} \left( \frac{g_c}{12} + \frac{g_H}{4} \right), \tag{6}$$

可得,

$$M = \frac{g_c}{4} + \varphi \frac{g_c}{24} + \alpha L_0 + \phi \frac{g_c}{12}. \tag{7}$$

燃烧前的工质数量为空气的千克摩尔数值  $L = \alpha L_0$ . 柴油车排气中,CO 的浓度很低,所以  $\varphi \approx 0$ . C 元素中以自由碳状态排出的百分比也很低,所以  $\phi \approx 0$ . 因此,柴油在燃烧前和燃烧后的分子

量变化系数为  $\beta = \frac{M}{L} = 1 + \frac{g_H}{4\alpha L_0}$ . (8)

2.1.2 烟雾排放流量的计算

通过上述计算,只需再求得单位里程内的燃油消耗量  $m_f$  和排气中各成份含量/浓度后,即可得排气流量  $G$  ( $m^3/km$ ):

$$G = \frac{1}{1.29} m_f \left( L + \frac{g_H}{4} \right), \tag{9}$$

式中: $g_H$  为 0.125 ~ 0.135 kg,对柴油取  $g_H = 0.130$  kg.

实际空燃比  $L$  的计算,可用 1965 年 Splindt. R. S 提出的在不完全燃烧的情况时由废气成分确定空燃比的计算方法,进一步推导后可得<sup>[6]</sup>

$$L = \frac{\rho_{CO} + \rho_{CO_2}}{\rho_{CO} + \rho_{CO_2} + \rho_{HC}} \left[ 11.49(1 - g_H) \right. \\ \left. \frac{1 + \frac{1}{2} \frac{\rho_{CO_2}}{\rho_{CO}} + \frac{\rho_{O_2}}{\rho_{CO_2}}}{1 + \frac{\rho_{CO_2}}{\rho_{CO}}} + \frac{119.8 g_H}{3.5 + \frac{\rho_{CO_2}}{\rho_{CO}}} \right]. \tag{10}$$

单位里程的单车烟雾排放量

$$q_v = GK \quad (m^3/km), \tag{11}$$

综上,

$$q_v = \frac{1}{1.29} m_f (L + 0.0325) K. \tag{12}$$

2.2 对于柴油车碳平衡燃油消耗计算模型的修正

因为  $m_f = \frac{FE}{100}$ , 需要知道柴油车行驶 1 km 产生的总颗粒物的质量  $m$  和其中碳颗粒的质量  $m_c$ .

$$m_c = \frac{m \times 30\%}{10^3} \quad (g \cdot km^{-1}), \tag{13}$$

其中  $m$  的百分比大约为 20% ~ 40%, 这里取 30%.

由消光系数  $K$  与颗粒物质量浓度  $C$  的关系为

$$K = 0.0061C - 0.01641^{[7]}, \tag{14}$$

可得,  $m = q_v C$ , (15)

且

$$q_v = \frac{1}{1.29} m_f (L + 0.0325) K, \tag{16}$$

$$m = \frac{m_f (L + 0.0325) K}{1.29} \cdot \frac{K + 0.01641}{0.0061} (mg/kg). \tag{17}$$

综上所述可得

$$FE = \frac{0.1155 [ (HC \times 0.866) + (CO \times 0.429) + (CO_2 \times 0.273) ]}{D - 2.044 \cdot 4K(L + 0.0325)(K + 0.01641)} \quad (L/100km), \tag{18}$$

式中: $FE$  为柴油车油耗, ( $L/100 km$ );  $D = 0.840$  kg/L; HC、CO、CO<sub>2</sub> 为 C:H = 1:1.86 的单位行驶里程的各气体成份排放质量; 当 C:H = 1:1.86 时,柴油中和未燃尽的 HC、CO、CO<sub>2</sub> 排放物中 C 的质量分别为 0.866、0.429、0.273;  $K$  为柴油车排出废气的消光系数,  $m^{-1}$ ;  $L$  为实际空燃比.

3 柴油车碳平衡油耗修正模型的验证

通过汽车转鼓试验台,将基于油耗仪的实测燃油消耗量和基于碳平衡法的修正前后模型计算燃油消耗量进行比对分析,验证模型的可行性和正确性.

3.1 试验车辆和设备

根据 GB/T 19233—2008《轻型汽车燃料消耗量试验方法》,试验前车辆至少应行驶 3 000 km,且少于 15 000 km. 试验车辆为行驶 8 000 km 的捷达柴油轿车,该车发动机主要参数:直列四缸、水冷、自然吸气式柴油发动机,排量为 1.896 L,压缩比为 19.0,额定功率为 47/4 000 (kW/rpm),最大扭矩为 125/2 200 ~ 2 600 (Nm/rpm).

3.2 试验设备

主要试验设备有 AVL 底盘测功机、日本小野油耗仪、AVL 不透光烟度计、HORIBA 五气分析仪等。

3.3 等速工况油耗试验结果

进行等速工况油耗试验,采用油耗仪实测法得到等速工况百公里油耗值,分别与笔者修正前、后的碳平衡法油耗计算值做对比,对比结果及相对误差见表 1。由表 1 可见,修正前、后的碳平衡油耗计算值相对于实测值的误差均在 4% 以内,修正后的误差更低。

表 1 修正前碳平衡法计算值与油耗仪实测值的比较

Tab.1 Comparison of no correction or correction of carbon balance method calculated value and measured value

车速 /(km· h <sup>-1</sup> )	油耗仪实测 /(L· (100 km) <sup>-1</sup> )	碳平衡法油耗 /(L· (100 km) <sup>-1</sup> )		相对于实测 值的误差/%	
		修正 前	修正 后		
				修正 前	修正 后
40	3.58	3.44	3.45	3.9	3.6
50	3.73	3.59	3.60	3.7	3.4
60	4.09	3.93	3.96	3.6	3.2
70	4.28	4.12	4.15	3.7	3.0
80	4.69	4.53	4.61	3.4	1.7
90	5.09	4.93	4.97	3.1	2.4
100	5.39	5.22	5.24	3.2	2.8
110	5.74	5.58	5.62	2.8	2.1
120	6.20	6.04	6.06	2.6	2.3

3.4 试验结果分析

根据表 1 修正后的数据绘制油耗拟合曲线见图 1。

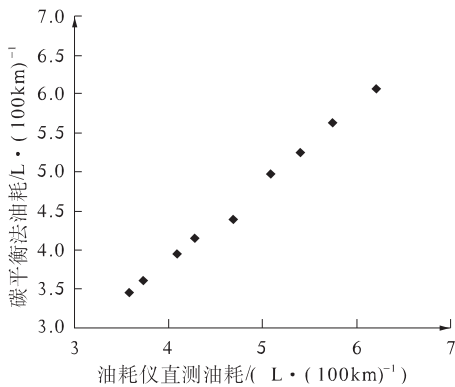


图 1 数据拟合曲线

Fig.1 Data-fitting cruve

碳平衡法计算油耗值与油耗仪实测油耗值之间呈明显的线性关系,进行一元线性回归,设回归

方程为: $y=a+bx$ . (19)

3.4.1 用最小二乘法求解系数

设  $x_i$  为油耗仪实测值, $\bar{x}$  为平均值; $y_i$  为碳平衡法计算油耗值, $\bar{y}$  为平均值, $n$  为数据个数,

$\bar{x}=4.7;\bar{y}=4.60;l_{xx}=6.6844;$

$l_{xy}=6.6746;l_{yy}=6.6972.$

一元线性回归方程为

$y=0.9985x+0.1429.$  (20)

3.4.2 线性关系显著性检验

设  $\bar{y}_0$  为预测值,查  $F$  分布表,分子自由度  $n_1$  = 自变量数 = 1,分母自由度  $n_2$  = 样本数( $n$ ) - 自变量数( $n_1$ ) - 1 = 7。取显著水平  $\alpha=0.01$ ,则,  $F_{0.01}(1,7)=12.5$ 。

回归平方和

$S_{\text{回归}}=\sum_{i=1}^n(\bar{y}_0-\bar{y})^2=\frac{l_{xy}^2}{l_{xx}}=6.6648.$  (21)

剩余平方和

$S_{\text{剩余}}=\sum_{i=1}^n(y_i-\bar{y}_i)^2=l_{yy}-\frac{l_{xy}^2}{l_{xx}}=0.0324.$  (22)

离差平方和

$S_{\text{离差}}=\sum_{i=1}^n(y_i-\bar{y})^2=l_{yy}=6.6972,$  (23)

可得, $F=\frac{S_{\text{回归}}}{S_{\text{剩余}}/(n-2)}=1448.8696,$  (24)

综上,由于  $F=1448.8696>>F_{0.01}(1,7)$ ,表明由试验数据得到的回归直线高度显著。

3.4.3 相关系数( $r$ )检验

$r=\frac{l_{xy}}{\sqrt{l_{xx}\cdot l_{yy}}}=0.9976.$  (25)

查相关系数临界值表,自由度为样本数( $n$ ) - 2 = 7,取显著水平  $\alpha=0.01$ , $r_{0.01}=0.7977$ ,可知  $r>r_{0.01}$ 。

综上所述,由相关系数检验表明,碳平衡法计算油耗与油耗仪实测油耗之间的线性关系特别显著。

4 结论

(1)修正后的碳平衡法计算模型考虑到排气中碳颗粒对柴油车油耗计算结果的影响,更加科学合理。

(2)通过汽车等速行驶工况试验验证结果显示,修正前、后的碳平衡油耗计算值相对于实测值

的误差均在 4% 以内,修正后的误差更低. 绘制修正后的数据拟合曲线并且验证其线性显著性,结果表明具有特别显著的线性关系.

笔者仅通过汽车等速行驶工况试验对修正后的计算模型进行验证,更复杂的工况循环油耗的计算模型有待进一步研究和验证.

参考文献:

[1] 中国汽车技术研究中心. GB/T 12545. 1—2008. 乘用车燃料消耗量试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2009.

[2] 中国汽车技术研究中心,国家轿车质量监督检验中心(天津)等. GB/T 19233—2008,轻型汽车燃料消

耗量试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2008.

[3] 许拔民. 汽车油耗标准及技术法规的现状与发展[A]. 中国汽车技术研究中心.

[4] 日本工业标准调查会(JISC). JIS D 1012, 自动车燃料消耗量试验方法[S]. 东京,2005.

[5] 周龙保. 内燃机学[M]. 北京:机械工业出版社,1999.

[6] 王贺武,刘浩学. 柴油车烟雾排放量测试新方法[J]. 交通工程学报,2002,4(12):43-48.

[7] 郭鹏,耿世彬,韩旭,等. 两种烟度计在柴油机排气净化装置检测中的应用研究[J]. 内燃机,2008,1(2):31-33.

Revision of Carbon Balance Calculating Model of Diesel Vehicle Fuel Consumption

YAN Ru-zhen<sup>1</sup>, CHEN Zhen-bin<sup>1</sup>, HE Jin-ge<sup>1</sup>, XIAO Ming-wei<sup>1</sup>, CHEN Xun-xiao<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China; 2. Hainan Tropical Automobile Test Co., Ltd, Qionghai 571400, China)

**Abstract:** Based on the analysis of different countries carbon balance calculation model of fuel consumption. Considering the emissions of the diesel vehicle consists a large ratio of carbon particulates, which will affect the calculating of the fuel consumption. Revised the carbon balance calculating model of diesel vehicles fuel consumption in our country. Through the vehicle constant velocity driving cycle test, the fuel consumption calculation results by correction model were compared with the measured results. And the relative error is within 4%. Draw the data-fitting cruve and verify linear significance and correlation coefficient. Results show that has special significant linear relationship. The analysis results show that the revised carbon balance calculating model applied to diesel? constant velocity driving cycle fuel consumption detection.

**Key words:** diesel vehicle, fuel consumption, carbon balance method, calculating model