

# 基于 PEMS 测量的机动车尾气预测研究

于 坤, 董红召, 李家文, 郝伟娜

(浙江工业大学 智能交通系统联合研究所 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 杭州 310014)

**摘要:** 为了实现对机动车尾气排放的控制, 解决现有预测模型未能通过燃油消耗来研究污染物排放以及未能建立起油耗及其车外可观测量影响因素之间的关系问题, 对油耗数据及其理论模型进行了研究, 提出了微观综合预测模型, 它是根据便携式尾气测量系统 (PEMS) 实际工况下测量的机动车油耗与各污染物排放数据, 并结合油耗的理论模型建立起的综合预测模型; 最后, 通过实验对综合预测模型进行了实例分析与验证; 实验结果表明, 综合预测模型首次对污染物 CO 和 NO 的预测模拟值和实测值之间的平均误差分别为 14.3% 和 12.8%, 实现了较好的预测效果, 为进一步研究燃油消耗和排放的关系奠定了很好的基础。

**关键词:** 机动车尾气排放; 尾气测量; 燃油消耗; 预测模型

## Research on Prediction of Vehicle Exhaust Based on Measurement by PEMS

Yu Kun, Dong Hongzhao, Li Jiawen, Hao Weina

(ITS Joint Research Institute, Ministerial and Provincial Key Laboratory of E&M,  
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** Aiming at realizing the control of vehicle exhaust emissions, solving the problem that the existing model can't predict the pollutant through the fuel consumption and establish the contact between the fuel consumption and the factors affecting the pollutant emissions, the date of the fuel consumption and the theoretical model were researched, then the microscopic comprehensive prediction model was proposed. It was the model that made by the date of fuel consumption and the pollutant emissions that based on the real world driving cycle measured by Portable Emission Measurement System (PEMS), and then combined the theoretical model of the fuel consumption. At last, the comprehensive prediction model was proved by using the real-time date that was also collected by the PEMS. The experimental result shows that the effect of the model used the first time was accurate enough to predict the pollutant emissions such as CO and NO that the error between the actual and the predicted was 14.3% and 12.8%, and lays the good foundation for further experiment with the contact between the fuel consumption and the pollutant emissions.

**Keywords:** vehicle exhaust emissions; exhaust measurement; fuel consumption; prediction model

## 0 引言

随着我国机动车保有量的不断增长, 机动车对燃油需求的不断增加, 能源危机及大气污染等问题也随之而来<sup>[1]</sup>。尾气污染给大气带来的影响尤为严重, 如以杭州市为例, 灰霾天数 20 世纪 70 年代只有 2 天, 80 年代和 90 年代共 143 天, 而到了 2011 年以后市区霾日数每年都有约 160 天并且呈现增长趋势<sup>[2]</sup>。因此, 为实现对机动车尾气排放的控制, 降低尾气排放对大气带来的污染, 对尾气排放的预测研究显得尤为重要。此研究为确定机动车污染物排放总量及其对环境影响量化分析提供了重要的依据<sup>[3]</sup>。通过尾气排放模型计算排放的方法在国内外机动车尾气排放研究过程中也取得了较好的应用效果<sup>[4]</sup>。

目前国内外对尾气排放预测模型已研究多年, 从美国最早提出的 MOBILE 模型以及其后来相应的改进模型, 之后针对地域性排放较强的 EMFAC 模型, 欧洲共同体的 COPERT 模

型, 国际可持续发展研究中心和加州大学河边分校开发的 IVE 模型, 再到国内目前引用广泛的郝吉明等研究模拟的多个大城市机动车排放因子模型, 以及后来国内针对国外不同模型的本地化修正研究模型, 利用油耗来研究尾气排放都没有得到引用<sup>[5-8]</sup>。并且, 油耗作为尾气排放的根源, 从此角度研究需要考虑的参数量少, 而且可以从油耗和各污染物排放的影响因素建立的联系找到油耗和排放的关系。因此, 本文结合大量的机动车实际排放数据进行研究分析, 并深入对发动机燃油消耗模型进行综合, 建立起符合实际城市道路交通特性的综合排放预测方法, 并获得了很好的模拟效果。这为更好地实现对机动车尾气排放的控制和对其污染状况的研究提供了一种新的思路。

## 1 油耗与污染物排放的相关性分析

首先, 在建立模型之前, 需要对燃油消耗和各污染物排放之间的数据进行相关性分析, 然后通过回归分析建立起燃油消耗和各污染物排放之间的模型。本数据选取的是多种典型小型客车的基于车载检测设备 (PEMS) 实际工况下的相关实验而测量的数据。实验选用若干款能够代表小型客车的车型, 因此其得到的预测模型只针对实际工况 (不含怠速工况) 下的小型客车的尾气排放。

根据数据参数以及建模需要的变量, 对机动车燃油消耗量和尾气排放作相关性分析。而相关性系数是此分析中使用的统

收稿日期: 2016-04-01; 修回日期: 2016-05-10。

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (SQ2014GX05D00758)。

作者简介: 于 坤 (1989-), 男, 江苏连云港人, 硕士研究生, 主要从事机动车尾气排放预测与控制方向的研究。

董红召 (1969-), 男, 教授, 博士生导师。主要从事智能交通车辆集成系统方向的研究。

计量, 对其做皮尔森相关系数和斯皮尔曼相关系数的统计, 皮尔森相关系数用于评价线性相关的变量间相关程度, 而斯皮尔曼相关系数用于评价非线性相关的变量间相关程度。表 1 是计算出的燃油消耗与各污染物排放之间相关系数的结果。选用的数据量为实验车运行一个综合城市工况, 约 0.5 小时的逐秒统计量 (近 2 000 条数据)。

表 1 油耗  $Q_t$  和各污染物排放间的相关系数

(皮尔森/斯皮尔曼)	
	$Q_t$
CO	0.409/0.434
NO	0.805/0.857
HC	0.201/0.199

从表 1 中可以得出以下结论: 1) 燃油消耗量与污染物 CO 和 NO 的排放紧密相关。这主要表现为油耗与污染物 CO 和 NO 排放之间的皮尔森相关系数和斯皮尔曼相关系数在 0.4~0.9 之间。2) 对于上述两种污染物来说, 油耗和排放的关系更倾向于非线性, 因为它们的斯皮尔曼相关系数比皮尔森相关系数大得多。3) 燃油消耗与污染物 HC 的排放之间的相关系数较小, 这暗示着 HC 污染物的成因有待更多数据的进一步研究, 用此方法研究此种污染物排放预测模型行不通。于是对污染物 CO 与 NO 分别按原数据进行回归分析。

2 综合预测模型的建立

对上述燃油消耗和污染物之间的数据建立回归模型, 最后综合燃油消耗模型可得到最终的综合预测模型。此预测模型充分考虑了城市道路非怠速驾驶工况下的机动车排放各主要车外可观测影响因素。

2.1 模型变量间回归方程的建立

污染物 CO 和 NO (通常对于 NO<sub>x</sub> 的研究主要针对 NO, 因为 NO<sub>2</sub> 的量相比 NO 甚少) 是汽车尾气排放中最主要的污染物, 燃油消耗量的增加, 其排放量也会明显增加。如图 1 是实验数据中的某一辆典型车型的机动车在某一段连续时间点对应的机动车燃油消耗量和尾气污染物 CO 排放率之间随时间变化的曲线图, 图 2 是对应的回归曲线图; 图 3 是燃油消耗量和尾气污染物 NO 排放率之间随时间变化的曲线图, 图 4 是对应的回归曲线图。

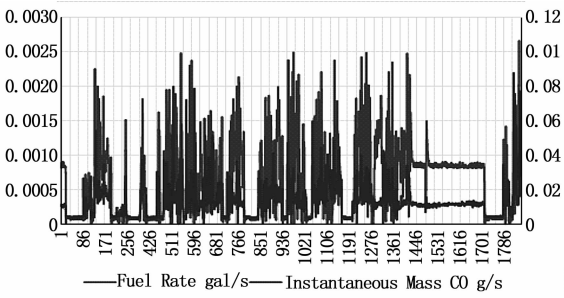


图 1 CO 排放率与燃油消耗量随时间变化曲线

根据上述图表分析可得如下回归方程, 选取拟合度最高的模型为先。式 (1) 为污染物 CO 得到的回归方程, 根据上述拟合结果得到其中的参数  $y_1=0.01679$ ,  $A_1=-0.01365$ ,  $t_1=1.97521E-4$ ; 式 (2) 为污染物 NO 得到的回归方程, 根

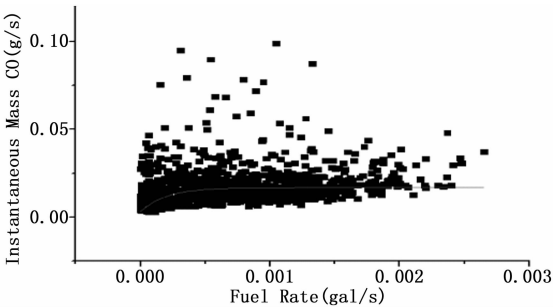


图 2 CO 排放率与燃油消耗量相关性曲线

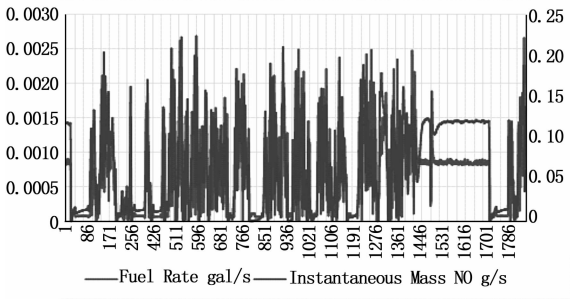


图 3 NO 排放率与燃油消耗量随时间变化曲线

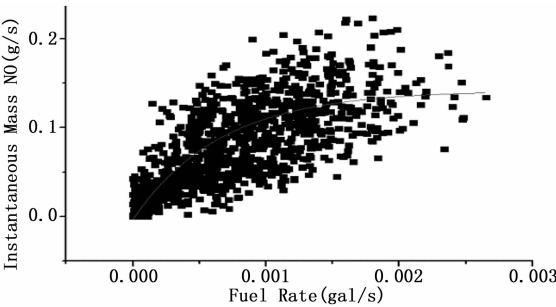


图 4 NO 排放率与燃油消耗量相关性曲线

据上述拟合结果得到参数  $y_2=0.14169$ ,  $A_2=-0.14494$ ,  $t_2=6.58168E-4$ 。

$$y = y_1 + A_1 e^{\frac{-x}{t_1}} \tag{1}$$

$$y = y_2 + A_2 e^{\frac{-x}{t_2}} \tag{2}$$

式中,  $x$  代表燃油消耗量,  $y$  代表各污染物的瞬时排放量 (分别为 CO、NO)。

2.2 油耗理论模型的建立

由于针对燃油消耗和影响因素之间建立起来的关系并没有得到推广, 而且从理论角度获得的模型避免了直接由回归分析建立的模型带来的参数量多而可能导致的精度问题。因此, 从汽车的行驶方程式出发, 结合功率平衡推导出实际道路工况下机动车的瞬时燃油消耗量模型。

对于机动车运行的每一瞬间, 发动机发出的功率  $Pe$  (kw) 始终等于机械传动损失的功率与全部运动阻力所消耗的功率之和, 设机动车行驶  $S$  (km) 用时  $t$  (s), 则有:

$$\frac{F_t S}{t} = (F_f + F_w + F_i + F_j) \frac{S}{t} = P_e \eta_T \tag{3}$$

式中,  $F_t$  为汽车的驱动力、 $F_f$  为滚动阻力、 $F_w$  为空气阻力、 $F_i$  为坡度阻力、 $F_j$  为加速阻力、 $\eta_T$  为传动系的机械效率。其

中,发动机发出的功率可以和燃油消耗率 $b^{[9]}$  (g/kw·h) 建立关系,在汽油发动机的万有特性图上,有等燃油消耗率曲线,根据这些曲线,可以确定发动机在一定转速 $n$  (r·min<sup>-1</sup>)、发出一定功率 $P_e$ 时的燃油消耗率 $b$ 。于是可以得到在某行驶速度 $V$  (m/s) 行驶某个很短的时间的燃油消耗量为 $Q_t$  (mL/s)。从而有:

$$Q_t = \frac{P_e b}{3\,600 \times \rho}$$

(4)

将式(4)带入式(3)并把其中各阻力表达式展开可以得到:

$$Q_t = \frac{b s 10^{-3}}{3\,600 \eta_r t \rho} (mg f \cos \alpha + \frac{1}{2} C_D A \rho_{air} V^2 + G \sin \alpha + \delta m a)$$

(5)

式中, $\rho$  (kg/L) 为汽油密度,  $m$  为机动车质量 (kg),  $g$  为重力加速度,取 9.8 m/s<sup>2</sup>,  $f$  为滚动阻力系数,  $\alpha$  为道路坡度,  $C_D$  为空气阻力系数,  $A$  为车辆迎风面积 (m<sup>2</sup>),  $\rho_{air}$  为空气密度,一般取值 1.2258 (N·s<sup>2</sup>·m<sup>-4</sup>),  $G$  为车轮负载 (N),  $\delta$  为旋转质量换算系数,  $a$  为车辆行驶加速度 (m·s<sup>-2</sup>)。于是初步得到模型的理论表达式为:

$$Q_t = k_1 m v + k_2 V^3 + k_3 m v i + k_4 m v a + \epsilon$$

(6)

式中,  $i$  为道路坡度参数,  $\epsilon$  为模型的误差项, 各个系数分别为式(7)~(10)所示:

$$k_1 = \frac{b g f 10^{-3}}{3\,600 \eta_r \rho}$$

(7)

$$k_2 = \frac{1}{2} C_D A \rho_{air} \times \frac{b 10^{-3}}{3\,600 \eta_r \rho}$$

(8)

$$k_3 = \frac{b g 10^{-3}}{3\,600 \eta_r \rho}$$

(9)

$$k_4 = \frac{b \delta 10^{-3}}{3\,600 \eta_r \rho}$$

(10)

根据研究的不同车型可带入与其对应的各自不同的系数从而得到不同车型的燃油消耗量模型,在此研究中,模型中需要带入小型客车的参数。由此可以看出车速、加速度、道路坡度参数、机动车质量等都为燃油消耗的主要影响因素,这也是影响排放的各车外可观测影响因素。进而结合上述根据大量燃油消耗和污染物排放的数据得到的回归分析模型,最终得出综合排放预测模型。

2.3 尾气排放微观综合预测模型的建立

根据上述推导和建模可以得出尾气排放微观综合预测模型如式(11)的CO预测模型和式(12)的NO预测模型。

$$CO(g/s) = y_1 + A_1 \times e^{\frac{k_1 m v + k_2 v^3 + k_3 m v i + k_4 m v a + \epsilon}{-1000 t_1 C}}$$

(11)

$$NO(g/s) = y_2 + A_2 \times e^{\frac{k_1 m v + k_2 v^3 + k_3 m v i + k_4 m v a + \epsilon}{-1000 t_2 C}}$$

(12)

式中,  $C$  为加仑 (gal) 和升 (L) 的换算值,取美国的换算值约为 3.785427。

3 实例分析及验证

实验的设计是为了评价以上建立的尾气排放综合模型在尾气预测方面的表现。采用的方法是用 PEMS 所测量的数据和综合预测模型模拟的结果进行对比分析,并得出各种污染物相应的误差,最终得出结论。

如图 5 是选取的随机验证实验车辆 (小型客车浙 A23 \* \* W) 的速度随着时间变化的原始曲线,图 6 是其相应的加速度

随着时间变化的原始曲线,实验选取的是非高峰期时段的测量 (避免了高峰期频繁的怠速工况,且红绿灯等待时间的影响相比总的实验测量时间可忽略),测量包含了等速工况和加(减)速工况,选取的实验场地坡度近似为零,故而模型的坡度项可忽略。

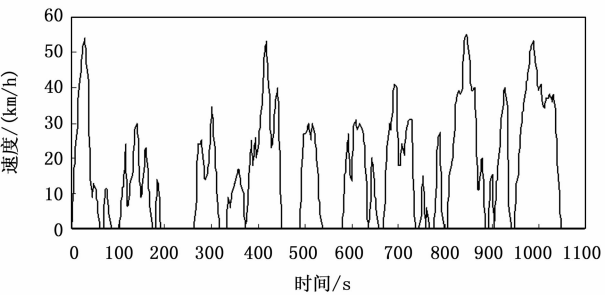


图 5 市区路速度随着时间变化的原始曲线

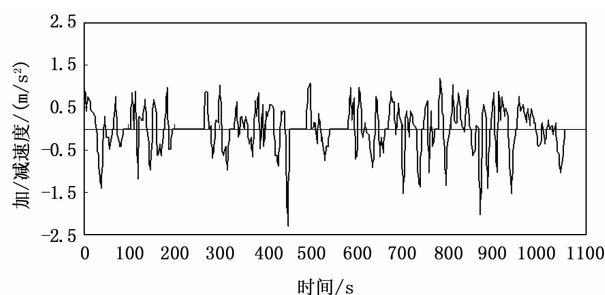


图 6 市区路加速度随着时间变化的原始曲线

从图中可以看出,实验测量包含了实际城市道路下的各种可能工况。在确定验证车辆在模型里的各个参数之后,按照上述所建立的综合排放预测模型模拟计算验证车辆的CO和NO排放速率,实测值和模拟值之间的关系如表2和表3所示。

表 2 等速工况实测值和模拟值对比结果

浙 A23 * * W 污染物排放 (g/s)						
	CO (实测、模拟、误差)			NO (实测、模拟、误差)		
等速	0.020	0.012	40.0%	0.013	0.010	23.1%
工况	0.010	0.009	10.0%	0.018	0.015	16.7%
测量	0.008	0.008	0.0%	0.015	0.016	6.7%

表 3 加速工况实测值和模拟值对比结果

浙 A23 * * W 污染物排放 (g/s)						
	CO (实测、模拟、误差)			NO (实测、模拟、误差)		
加速	0.007	0.007	0.0%	0.018	0.018	0.0%
工况	0.013	0.010	23.1%	0.015	0.017	13.3%
测量	0.008	0.009	12.5%	0.012	0.014	16.7%

由表2和表3可见:运用综合预测模型对污染物CO和NO进行预测,在等速工况下的模拟值和实测值的平均误差分别为16.7%和15.5%,在加速工况下模拟值和实测值的平均误差分别为11.9%和10.0%,总的平均误差分别为14.3%和12.8%。结合上述燃油消耗和污染物的相关系数,表明预测模型对NO的预测效果比对CO的预测效果好,这是由于NO的

(下转第 64 页)