

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.11.006

整车排放试验污染物瞬态质量测量方法研究

熊志凯¹, 王凤金²

(1. 江铃汽车股份有限公司, 江西 南昌 330001; 2. 格特拉克(江西)传动有限公司, 江西 南昌 330011)

摘要:针对整车排放开发试验中直采排放测量设备不能直接测量出污染物瞬态质量的问题, 采用了在袋采排放测量系统中增加稀释空气流量计 SAO 或者示踪 CO₂ 分析仪的方法, 将袋采和直采测量设备关联起来, 实现了污染物的瞬态质量测量。采用 SAO 方法时, 通过测量混合前稀释空气的瞬态流量, 计算出汽车排气的瞬态体积, 再用直采系统测出污染物的瞬态体积浓度值就可以换算成汽车排气污染物的瞬态质量值。采用 Trace CO₂ 方法时, 通过比较稀释管道中混合气的 CO₂ 瞬态体积浓度值与稀释前尾气的 CO₂ 体积浓度, 得出了动态稀释比, 从而间接计算出了汽车排气的瞬态体积, 进而计算出污染物瞬态质量值。试验结果证明, 加装稀释空气流量计 SAO 和示踪 CO₂ 分析仪的排放测量系统, 能够有效测量出汽车排气中污染物的瞬态质量值。

关键词:定容稀释采样系统; 直接采样测量; SAO 测量法; 追踪二氧化碳测量法

中图分类号: TH122; U467.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)11-1323-06

Pollution real-time mass measurement method for vehicle emission test

XIONG Zhi-kai¹, WANG Feng-jin²

(1. Jiangling Motor Co., Ltd., Nanchang 330001, China; 2. GETRAG (Jiang Xi) Transmission Co., Ltd., Nanchang 330011, China)

Abstract: Aiming at exhaust pollution instantaneous mass not been directly measured by direct sampling measurement system in vehicle development emission test, SAO and trace CO₂ analyzer were developed. SAO was used to real time measure dilution air flow rate. Through CVS flow rate subtracts dilution air flow rate, the vehicle exhaust gas flow rate can be calculated. Trace CO₂ analyzer was used to real time measure CO₂ concentration of diluted gas. Through computing the dynamic ratio of CO₂ concentration of diluted gas with CO₂ concentration of tailpipe exhaust gas, the vehicle exhaust gas flow rate also can be calculated. Then pollution instantaneous mass can be calculated through multiplying tailpipe pollution concentration with vehicle exhaust real time volume at the same time. The emission test results indicate that the emission measurement system which additional SAO or trace CO₂ analyzer can efficiently measure vehicle pollution instantaneous mass.

Key words: constant volume sampling(CVS) system; direct sample measurement; SAO method; trace CO₂ method

0 引言

众所周知, 对于设计总质量小于 3.5 t 的轻型汽车, 必须满足我国整车排放法规 GB18352. 2005 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国 3、4 阶段)。汽车制造厂及标定开发公司在汽车排放性能的开发时, 要进行大量的汽车排放试验。

现在世界各国的排放法规大多规定对汽车的排气

先用干净空气进行稀释, 然后用定容稀释取样(CVS)系统取样。除取样袋收集的气体外, 绝大部分排气被排出取样器, 由测量器测量排出气体的总流量^[1]。然后通过分析仪测量出样气袋的样气平均浓度来确定汽车尾气污染物的总排放量。该方法对判断车辆排放是否达到法规排放标准准确有效。但是它不能提供尾气污染物的原始瞬态排放量, 因此对排放开发试验则需要增加直接采样排放测量设备, 测量出汽车尾气污染物

的瞬态体积浓度。而对于汽车制造厂来说,排放开发试验的瞬态排放数据非常重要,因为它能为汽车 ECU 标定程序的优化提供有效的指导方向和修改依据。

通常,直采瞬态测量设备只能测量出污染物瞬态体积浓度值,而不能测量出污染物的瞬态质量值。污染物的瞬态质量值是绝对值,它对汽车 ECU 程序的调整更有指导依据。

如果,直采与袋采排放测量设备只是相互独立地使用,两者由于缺少必要的数据通道间沟通,使得直采设备测得的污染物体积浓度值不能换算成污染物瞬态质量。

在基于福特汽车公司多年来排放技术研究的基础

上,江铃汽车公司排放实验室在袋采排放测试系统增加了稀释空气流量计(SAO)和示踪 CO₂ 分析仪,来实现污染物瞬态质量值的测量。

1 整车排放开发测量系统

江铃汽车股份公司的整车排放开发测试系统为日本 HORIBA 的产品,系统示意图如图 1 所示。图 1 中,右侧虚线框是全流式定容稀释袋采排放测量系统。稀释是指汽车尾气要先用干净的环境空气进行稀释混合,降低排气温度和湿度,不产生水凝结,稳定排气成份。定容是指稀释排气的总流量保持不变。

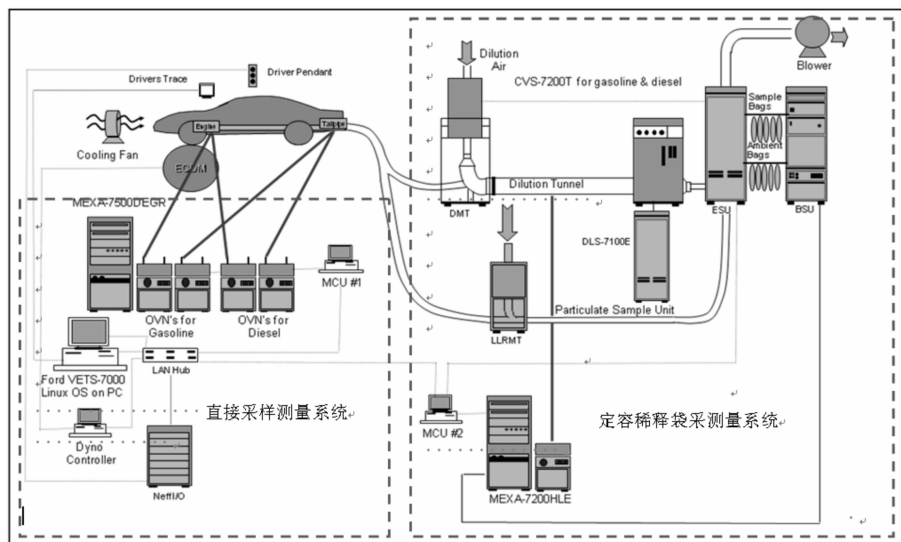


图 1 日本 HORIBA 整车排放开发测试系统示意图

图 1 所示的油车全流定容稀释采样系统中,排气风机“Blower”同时抽吸稀释空气“dilution air”和汽车尾气“Vehicle Exhaust”,两者在稀释管道“Dilution Tunnel”中充分混合后,经过临界流文丘里管 CFV,使稀释混合气体总流量保持稳定。临界流文丘里管的原理是当 CFV 的下游压力 P 下降到某一压力 P_c 时,通过喷嘴的质量流量将达到最大值,此时喷嘴出口的流速已达到当地音速。如果继续降低下游端压力 P_0 ,通过最小喉口处的气体流量将不再增加,流速保持音速不变。喷嘴出口的流速达到音速的压力 P_c 称为临界压力, P_c/P_0 称为临界压力比,此时通过喷嘴的流量称为临界流量^[2-4]。

排放实验时应注意:选择 CVS 的流量要防止实验过程有水凝结。主要是考虑下列 5 个要素:①背景空气的湿度;②燃油类型;③发动机的排量;④采样系统的压力和温度;⑤采样系统管道内壁的粗糙度^[5]。

1.1 平均稀释比 DF

气袋采样排放测量过程中,系统以定容稀释方式

抽排发动机尾气的同时,以某个固定的流量(例如 5 L/min)从稀释混合气“Diluted Exhaust”中抽吸代表性样气,充入样气袋“Sample Bags”,同时系统以相同流量抽吸用于稀释的环境空气“Dilution air”,充入到背景气袋“Ambient Bags”。待试验循环结束后,排放分析系统分析样气袋和背景气袋中气体污染物 CO, THC, NO_x, CO₂ 浓度。按下式对稀释后的气态污染物浓度 C_i 进行修正:

$$C_i = C_e - C_d \left(1 - \frac{1}{DF} \right) \tag{1}$$

式中: C_i —稀释排气中污染物 i 的浓度,并用稀释空气中 i 的含量进行修正, ppm; C_e —稀释排气中测得的污染物 i 的浓度, ppm; C_d —稀释空气中测得的污染物 i 的浓度, ppm; DF —稀释系数。

公式(1)中的汽油车或柴油车的稀释系数 DF 是测试循环内的平均稀释系数,其计算公式^[6]如下:

$$DF = \frac{13.4}{C_{CO_2} + (C_{THC} + C_{CO}) \times 10^{-4}} \tag{2}$$

式中: C_{CO_2} —取样袋中稀释排气的 CO₂ 浓度, % (体积

百分数); C_{THC} —取样袋中稀释排气的 THC 浓度, ppmC (ppm 碳当量); C_{CO} —取样袋中稀释排气的 CO 浓度, ppm。

对全流稀释 CVS 而言,由于其是一种变稀释度的取样系统,测试过程中的不同阶段稀释度是不同的,稀释因子是一个不断变化的值,因而上述稀释因子的计算只是统计估算,受稀释空气中 HC, CO_2 浓度的影响^[7]。

1.2 袋采测量的污染物综合工况质量排放

按下列公式计算出该汽车每公里的污染物的质量排放量(单位:g/km):

$$M_i = \frac{V_{\text{mix}} \times Q_i \times k_H \times C_i \times 10^{-6}}{d} \quad (3)$$

式中: M_i —污染物 i 的排放质量, g/km; V_{mix} —稀释排气的容积(校正至标准状态 273.2 K 和 101.33 kPa), L/试验; Q_i —在标准温度和压力(273.2 K 和 101.33 kPa)下污染物 i 的密度, g/L; k_H —用于计算氮氧化物的排放质量的湿度修正系数(THC, CH_4 和 CO 修正系数为 1); C_i —稀释排气中污染物 i 的浓度,并用稀释空气中 i 的含量进行修正, ppm; d —相当于运动循环的实际距离, km。

1.3 直采排放测量

图 1 左侧虚线框中是直接采样排放测量设备。直采取样法,是将取样探头插入发动机的排气管中,用取样泵连续抽取一定量气体不经稀释直接送入分析系统进行分析仪^[8]。图 1 中直采系统柴油和汽油测量各有两路采样加热管,可以同时测量催化器前后稀释前的尾气污染物浓度,计算出催化器对污染物的转化效率。

2 整车排放开发测量系统

直采测量出来的污染物体积浓度是相对值,工程师们更希望得到瞬态质量排放量。因为瞬态质量排放量是绝对量,它能更加准确地说明汽车在某时刻的尾气排放量。

一般排气成分分析仪器都是测量该成分在排气中的浓度或者体积分数,然后可以根据内燃机的排气总流量算出该成分的总排放质量。但是由于排放法规试验循环中,内燃机是变工况运转,即转速和负荷都是变化的,因此内燃机的排气瞬态体积也是随工况变化的,而且实际上排气管压力随工况变化复杂,尾气脏污,废气温度高且变化范围大,因此内燃机瞬态排气流量难以测量,导致研究者无法准确计算出污染物的瞬态质量排放量^[9]。

通过采用 Trace CO_2 测量法和 SAO 测量法这两种方法,可以间接测量出汽车尾气的瞬态体积,从而将污染物的体积浓度换算成为瞬态质量排放量。

2.1 Trace CO_2 测量法

袋采排放测量系统中,可增加一路 CO_2 快速响应测量分析仪,用于追踪稀释排气的 CO_2 瞬态浓度变化 $[\text{CO}_2]_{\text{TRACE}}$ 。通过以下公式可以计算出稀释排气的动态稀释比系数 DR :

$$DR = \frac{[\text{CO}_2]_{\text{TP}} - [\text{CO}_2]_{\text{AMBIENT}}}{[\text{CO}_2]_{\text{TRACE}} - [\text{CO}_2]_{\text{AMBIENT}}} \quad (4)$$

动态稀释比 DR 也等于汽车发动机的排气流量 V_e 和稀释排气流量 V_{mix} 之比^[10]。即由以下公式计算出汽车发动机的瞬时排气量 V_e :

$$DR = \frac{V_{\text{mix}}}{V_e} \quad (5)$$

按下式可计算出汽车尾气污染物的瞬时质量排放量 $Mass_{\text{CVS}(i)}$:

$$Mass_{\text{CVS}(i)} = \frac{Q_{(i)} \times [i]_{\text{TP}} \times V_e \times t}{1000} \quad (6)$$

式中: $Mass_{\text{CVS}(i)}$ —污染物 i 瞬态质量排放, mg/s; Q_i —在标准温度和压力(273.2 K 和 101.33 kPa)下污染物 i 的密度, g/L; $[i]_{\text{TP}}$ —稀释前污染物 i 的浓度, ppm; V_e —发动机的瞬态排气流量, L/s; t —试验循环的采样时间, s。

2.2 SAO 测量法

稀释空气洁净,温度较为稳定(20 °C ~ 30 °C),可使用流量计测量稀释空气流量。一些先进的汽车排放开发台架的定容取样排放系统,在稀释管道的混合三通前安装一个光滑孔流量计 SAO,测量稀释空气流量 V_{AIR} 。CVS 稀释排气的瞬态总流量 V_{mix} 减去稀释空气的瞬态流量 V_{AIR} ,就是汽车排气的瞬态流量 V_e :

$$V_e = V_{\text{mix}} - V_{\text{AIR}} \quad (7)$$

然后按照式(6),可以计算出稀释排气中污染物的瞬时质量排放量 $Mass_{\text{CVS}(i)}$ 。

2.3 采样损失的补偿修正

直采测量系统要从汽车的排气管中抽走一部分发动机尾管的原始尾气。这部分被抽走的样气就不能再参与排气混合稀释,造成袋采系统中稀释混合前发动机原始样气的损失,因此对于精确测量来说,需要进行采样补偿,以修正袋采测量结果。

直采设备的连续采样流量是固定的。例如,日本 Horiba 的 MEXA-7500DEGR 设备的每条直采管路采样流量为 12 L/min。按照下式,可计算出直采样气损失

的污染物质量 $Mass_Correct_{(i)}$:

$$Mass_Correct_{(i)} = \frac{Q_{(i)} \times [i]_{TP} \times V_{DIRECT_SAMPLE} \times t}{1\ 000} \quad (8)$$

式中: $Mass_Correct_{(i)}$ —直采采样损失的各污染物 i 排放质量, mg/s; Q_i —在标准温度和压力 (273. 2 K 和 101. 33 kPa) 下各污染物 i 的密度, g/L; $[i]_{TP}$ —稀释前污染物 i 的浓度, ppm; V_{DIRECT_SAMPLE} —直采测量系统的采样流量 L/s; t —试验循环的采样时间, s。

按照下式, 可计算出补偿修正后各污染物的排放总质量:

$$Mass_{(i)} = Mass_CVS_{(i)} + Mass_Correct_{(i)} \quad (9)$$

2.4 两种方法的比较

(1) SAO 流量计的体积测量精度高。以日本 HORIBA 公司的 SAO 流量计为例: 其精度为读数值的 $\pm 0.5\%$, 且动态响应快。

(2) 分析仪的测量误差相对较大, 首先, 分析仪自

身的线性精度通常为 1% ; 另外, 我国的标定量距气体与零气的标签浓度误差通常为 2% 以上, 而且直采样气到达直采 CO_2 分析仪与尾气经过稀释到达 Trace CO_2 分析仪的时间存在差异, 这都增加了对瞬态质量排放的计算误差。

因此, 理论上 SAO 测量法的测量精度更高。

3 试验验证

本研究以江铃汽车股份有限公司的某一皮卡车的排放开发试验为例, 说明这两种方法如何完成对污染物瞬态质量排放量的计算。

3.1 排放瞬态数据曲线

排放测试循环中, 直采测得的 Tailpipe 二氧化碳瞬态浓度值和车速值随实验时间的数据曲线如图 2 所示。

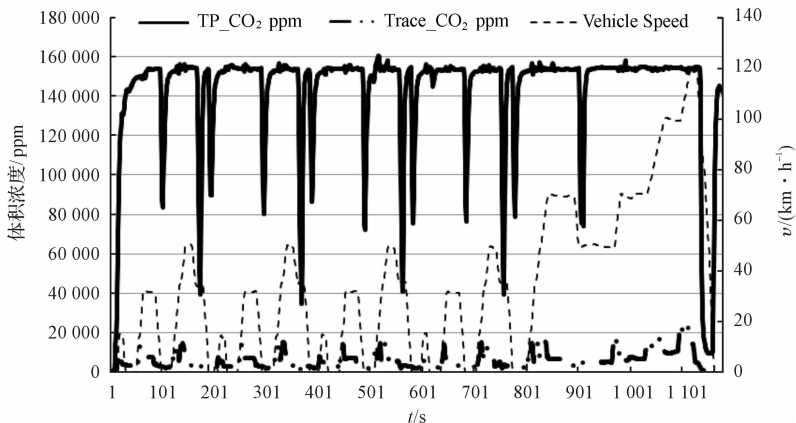


图 2 直采 Tailpipe 和稀释 Trace CO_2 浓度曲线

排放测试循环中, 直采 Tailpipe 的 CO_2 浓度和稀释示踪 Trace CO_2 浓度计算出的动态稀释比曲线和

用 SAO 测量法计算出的动态稀释比曲线如图 3 所示。

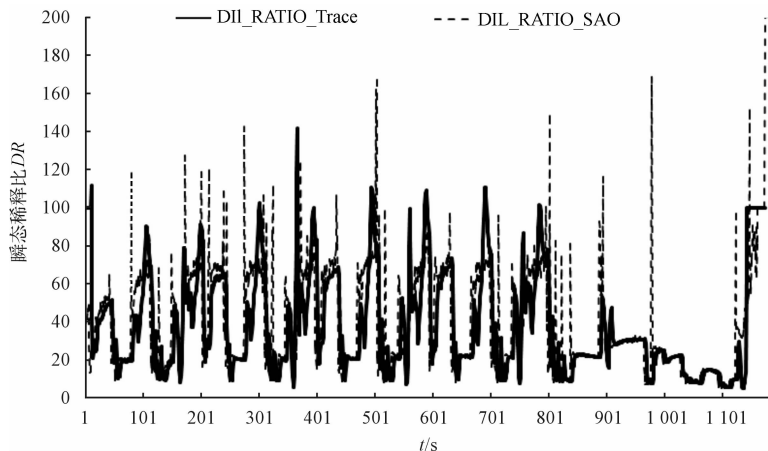


图 3 两种方法计算得到的动态稀释比曲线

图 3 中的两条动态稀释比曲线反映出, 这两种方法计算出来的动态稀释比基本接近, 但不完全相同。

SAO 法测量的动态稀释比与发动机的工况特性更加接近。催化器后污染物 (NO_x) 瞬态浓度曲线如图 4 所示。

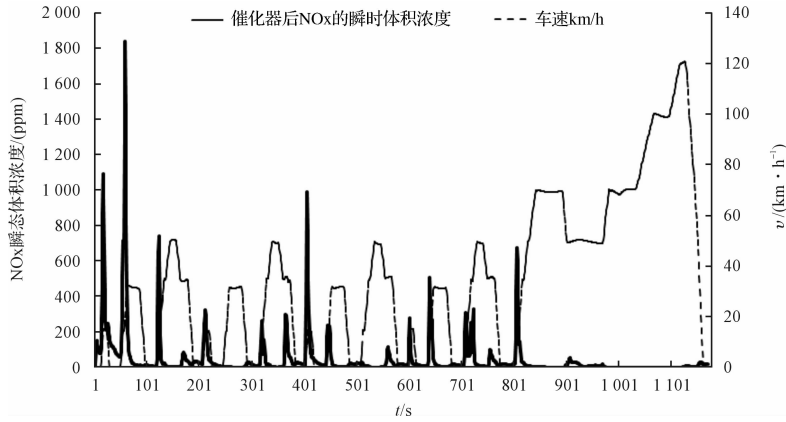


图 4 催化器后 Tailpipe 的 NO_x 瞬态浓度与试验工况速度曲线

根据计算出来的动态稀释比 DR , 由公式(5,6)可以计算得出 NO_x 的瞬态质量排放量。计算得到 NO_x 的瞬态质量排放量和累计排放量如图 5 所示。图中的细实曲线表示 NO_x 的瞬态质量排放值, 图中的粗双点

划曲线表示 NO_x 的累积质量值。

3.2 排放试验报告

该台试验样车的此次排放结果如图 6 所示。

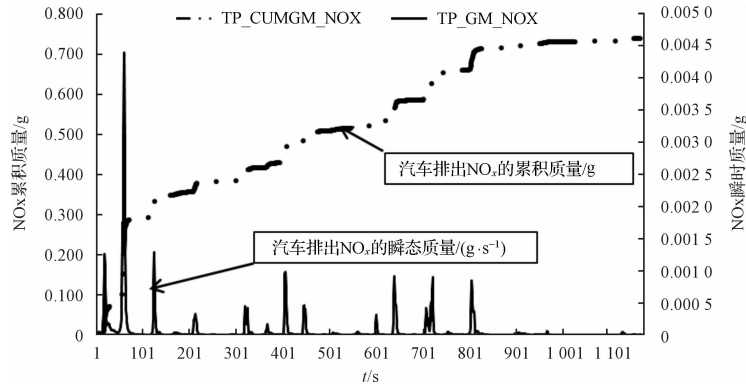


图 5 SAO 方法计算得到的 NO_x 瞬态质量排放量及 NO_x 累积质量曲线

Phase 1	Bag 1	THC/(ppmC)	CO/(ppm)	NOX/(ppm)	CO ₂ /(%)	CH ₄ /(ppmC)	NM-HC/(WRF)	HC + NOX	PART/(#)	FE/(l/100 km)
Range		24.0	50.0	20.0	1.00	10.0				
Sample		7.411	23.523	2.533	0.4897	2.464				
Range		24.0	50	20.0	1.00	10.0				
Ambient		3.404	1.029	0.016	0.0487	2.046				
Net Conc.		4.133	22.532	2.517	0.4428	0.493	3.6393			
Modal Corr.		0.0276	0.2912	0.0424	92.2165	0.0000	0.0276			
Grams/ph		0.3393	3.7207	0.6354	1151.7980	0.0430	0.3020	0.9747	1.194e+12	12.2063
Grams/km		0.0839	0.9207	0.1572	285.0010	0.0107	0.0747	0.2412	2.954e+11	
Phase 2	Bag 2	THC/(ppmC)	CO/(ppm)	NOX/(ppm)	CO ₂ /(%)	CH ₄ /(ppmC)	NM-HC/(WRF)	HC + NOX	PART/(#)	FE/(l/100 km)
Range		24.0	50.0	20.0	1.00	10.0				
Sample		3.870	3.405	0.504	0.7673	2.398				
Range		24.0	50	20.0	1.00	10.0				
Ambient		3.367	0.952	0.016	0.0488	2.043				
Net Conc.		0.695	2.508	0.489	0.7213	0.473	0.2224			
Modal Corr.		0.0018	0.0059	0.0051	50.0753	0.0000	0.0018			
Grams/ph		0.0287	0.2012	0.0639	933.1946	0.0211	0.0104	0.0926	2.892e+11	5.7251
Grams/km		0.0041	0.0290	0.0092	134.4174	0.0030	0.0015	0.0133	4.165e+10	
Test Summary		THC	CO	NOX	CO ₂	CH ₄	NM-HC(WRF)	HC + NOX	PART(#)	FE(l/100 km)
Total										
T. Grams		0.3679	3.9219	0.6994	2084.9927	0.0642	0.3125	1.0673	1.483e+12	8.1098
Grams/km		0.0335	0.3571	0.0637	189.8227	0.0058	0.0284	0.0972	1.350e+11	

图 6 排放试验结果

4 结束语

本研究通过理论推导和排放试验证明,使用 SAO 流量计或者 TRACE CO₂ 分析仪,都可将直采测量系统测得的污染物体积浓度值精确换算成污染物的瞬态质量排放值,从而更加有效地支持汽车排放属性的开发和 ECU 标定程序的调整。

SAO 流量计和 Trace CO₂ 分析仪的目的都是计算出排放试验过程中的动态稀释比。SAO 流量计的测量精度高,且有附加功能,例如标定 CFV 的流量等,所以推荐它为首选。而 Trace CO₂ 分析仪体积小、成本低,安装方便,也是一种选择。当然在项目预算成本允许的情况下,可以考虑同时安装这两个部件,以完善整车排放开发测试系统。

参考文献(References):

- [1] 龚金科,黄景宇. 汽车排放及控制技术[M]. 北京:人民交通出版社,2010.
- [2] 梁国伟,周宁宁,李长武. 临界流文丘里喷嘴流量计的原理与应用[J]. 北京:中国计量学院学报,2004,15(3):

186-190.

- [3] 李春辉. 临界流文丘里喷嘴气体流量标准装置[J]. 中国计量,2012(12):113.
- [4] 李勤. 现代内燃机排气污染物的测量与控制[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [5] HOOD F J, SILIVS W M. Predicting and Preventing Water Condensation in Sampled Vehicle Exhaust for Optimal CVS Dilution[N]. USA, SAE Paper,1998,980404.
- [6] 国家标准化工作委员会. GB18352.3—2005 中国标准书号[S]. 北京:中国标准出版社,2005.
- [7] THOMAS C A, CARETTO L S. Improving the Calculation of Exhaust Gas Dilution During Constant Volume Sampling [N]. USA, SAE Paper,1998,980678.
- [8] 周小松,郎静. 定容取样系统简介[J]. 柴油机设计与制造,2005,14(3):39-42.
- [9] 刘巽俊,许斯都,周龙保. 内燃机的排放与控制[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- [10] BEHRENDT H, MÖRSCH O. Studies on Enhanced CVS Technology to Achieve SULEV Certification[N]. USA, SAE Paper,2002-01-0048.

[编辑:张翔]

(上接第 1316 页)

- [3] AZEVEDO J L, LAU N, CORRENTE G, et. al. CAMBADA' 2008: Team Description [CD]. Paper RoboCup 2008 Suzhou, CD-ROM, Suzhou, China,2008.
- [4] LUNENBURG J J M, VEN G V D. Tech-United Team Description [CD]. RoboCup 2008 Suzhou, CD-ROM, Suzhou, China,2008.
- [5] ZHANG Hui, LU Hui-min, JI Xiu-cai, et al. NuBot Team Description Paper 2008 [CD]. RoboCup 2008 Suzhou, CD-ROM, Suzhou, China,2008.
- [6] 李永新,李尚荣,杜华生,等. F-180 足球机器人结构与仿真分析[J]. 机电工程,2003,20(6):56-60.
- [7] 卢盛才,海丹,王祥科,等. RoboCup 中型组足球机器人主动控球机构设计[J]. 机电工程,2009,26(11):13-17,67.
- [8] 皮骄阳,李永新,李鹏,等. 基于 DSP 的足球机器人控

制电路设计研究[J]. 电气自动化,2006,28(1):17-29.

- [9] 田立东,周继军,秦会斌. PWM 调光 LED 驱动器设计[J]. 机电工程,2012,29(4):465-468.
- [10] 劳立辉,窦争宝,刘凤连. 移动机器人控制系统[J]. 轻工机械,2012,30(3):50-53.
- [11] 赵晓,汪明,李晓明. 改进扩展卡尔曼滤波算法在智能足球机器人比赛中的应用[J]. 机电工程,2012,29(3):334-338.
- [12] 汪明,赵晓,李晓明. 基于 FPGA 的小型足球机器人无线通信子系统的设计[J]. 机电工程,2011,28(11):1386-1390.

[编辑:张翔]

本文引用格式:

熊志凯,王凤金. 整车排放试验污染物瞬态质量测量方法研究[J]. 机电工程,2013,30(11):1323-1328.

XIONG Zhi-kai, WANG Feng-jin. Pollution real-time mass measurement method for vehicle emission test [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2013,30(11):1323-1328.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>