

基于3B-MAW方法的PEMS测试工况研究

钟祥麟, 李腾腾, 张超, 于全顺

中汽研汽车检验中心(天津)有限公司, 天津 300300

摘要:为研究美国2区/3区移动平均窗口法(2 bin/3 bin-moving average window, 2B/3B-MAW)与我国便携式排放测试系统(portable emission measurement system, PEMS)方法的差异,选择3辆样车按照3B-MAW的测试方法开展测试和数据分析,并对其中2辆样车按国六排放标准进行PEMS测试,对比分析不同试验方法的车辆运行工况特征和差异。结果表明:车辆采用3B-MAW测试方法测试的实际道路运行负荷概率分布符合随机事件特征;将低负荷区和中高负荷区合并考核更符合车辆的实际运行情况;试验时间不少于6h的运行工况能够代表车辆运行的随机特征。

关键词:重型车;PEMS;2B/3B-MAW;运行工况;概率分布

中图分类号:X734.2

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2023)04-0028-07

引用格式:钟祥麟,李腾腾,张超,等.基于3B-MAW方法的PEMS测试工况研究[J].内燃机与动力装置,2023,40(4):28-34.

ZHONG Xianglin, LI Tengting, ZHANG Chao, et al. Study on PEMS test cycle based on 3B-MAW method [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2023, 40(4): 28-34.

0 引言

重型柴油车国六排放标准已于2021年7月1日全面实施,为了更好地监管和考核车辆的真实排放,国六排放标准推出了便携式排放测试系统(portable emission measurement system, PEMS)试验测试项目^[1]。与传统的转鼓试验相比,PEMS试验采用真实的应用场景和道路环境,更真实可靠地反映由于环境、交通、驾驶模式等因素导致的汽车排放变化^[2-8]。

目前,世界各国正在积极推进下一阶段汽车排放标准的编制工作。2022年11月10日,欧盟委员会提出了欧七排放标准提案,该提案针对PEMS测试方法和限值升级的占比较大,并建议重型车欧七排放标准在2027年7月1日起实施^[9]。2022年12月20日,美国环保署(environmental protection agency, EPA)通过了《控制新型机动车的空气污染:重型发动机和车辆标准》,该标准中针对PEMS测试提出了新的测试方法和限值标准,提出采用2区移动平均窗口法(2 bin-moving average window, 2B-MAW)取代当前的非标准循环(not-to-exceed, NTE)方法^[10]。2B-MAW方法借鉴了加州空气资源委员会(California air resources board, CARB)在2021年9月9日发布的《2004年及后续型号重型柴油发动机和车辆的加利福尼亚州废气排放标准和测试程序》新修正案中提出的3区移动平均窗口法(3 bin-moving average window, 3B-MAW)^[11]。在欧洲提案和美国下一阶段PEMS测试方法中,针对车辆的行驶工况均有一个典型改变:测试过程中对车辆行驶工况不做特殊规定,车辆按通常的用途进行驾驶。

利用PEMS对整车排放进行评估主要采用移动平均窗口法(moving average window, MAW)^[12-14]。目前我国和欧洲的重型车排气污染物车载测量方法均采用以瞬态循环(world harmonized transient cycle, WHTC)的循环功划定窗口的功基窗口法。而CARB提出的3B-MAW法为时间平均窗口法,将窗口时间

收稿日期:2023-04-13

第一作者简介:钟祥麟(1974—),男,天津人,工学博士,高级工程师,主要研究方向为机动车排放控制技术,E-mail:zhongxianglin@catarc.ac.cn。

设为 300 s,窗口的起始点按时间顺序在数据中每个有效数据开始,窗口时间步长 $\Delta_t = 1$ s,向后平移并彼此重叠。

为研究美国 2B/3B-MAW 方法与我国 PEMS 测试方法的不同,本文中选取 3 辆样车按照 3B-MAW 的测试方法开展测试和数据分析,同时针对其中 2 辆样车按国六排放标准进行 PEMS 测试,对比分析不同试验方法车辆运行工况的特征和差异,为我国下阶段重型车整车排放测试标准的制定提供技术参考。

1 试验设备及方法

1.1 试验样车和试验设备

本文中试验样车均满足国六排放标准,试验车辆基本参数和加载情况如表 1 所示。

表 1 试验车辆基本参数

样车编号	类型	燃料类型	额定功率/kW	最大总质量/t	加载比例/%
1	N3	柴油	415	49.0	90.0
2	N2	柴油	103	8.2	46.0
3	N3	燃气	404	48.9	17.5

采用 HORIBA 公司 OBS-ONE-GS12/PN 车载排放测试设备对试验样车行驶过程中的主要排放污染物进行测试,该设备测量原理及量程如表 2 所示。

表 2 试验设备测量原理及量程

测试组份	测量原理	量程	测试组份	测量原理	量程
CO	加热型 NDIR ^①	0 ~ 10% ^②	NO _x	加热型 CLD ^③	0 ~ 3 000×10 ⁻⁶ ^②
CO ₂	加热型 NDIR ^①	0 ~ 20% ^②	PN	CPC ^④	0 ~ 5×10 ⁷ 个/cm ³

①非分散红外技术;②指体积分数;③化学发光法;④凝结核粒子计数器。

测试设备与整车的连接方式如图 1 所示,其中 GAS 模块用于测试气态排放物 CO、CO₂、NO_x, 粒子数量 (particle number, PN) 模块用于测试颗粒物数量。

1.2 试验方法

EPA 的 2B-MAW 方法是借鉴了 CARB 的 3B-MAW 方法,基本试验和计算方法本质相同。因此本文中按照 3B-MAW 的试验方法开展试验和数据分析。

3B-MAW 试验方法中,车辆按通常用途在实际道路行驶,驾驶工况不做特别规定。数据处理使用基于

300 s 参考时间的 MAW 方法,即计算时长为 300 s 的子集有效数据计算污染物排放质量,如果窗口遇到无效数据,则跳过,继续包含后续有效数据,直至窗口中有效数据的时间达到 300 s。如果无效数据连续时间超过 600 s,则窗口终止,待后续再次遇到有效数据时,重新生成新窗口。窗口将以 $\Delta_t = 1$ s 相互重叠。

发动机负荷比^[15]

$$\eta_L = \frac{3600}{E_1 P_{\max}} \times \frac{\sum_{t=1}^{300} q_{m,t} T}{300}, \quad (1)$$

式中: E_1 为单位为 g/(kW·h) 的中国重型商用车瞬态工况 (China world transient vehicle cycle, C-WTVC)

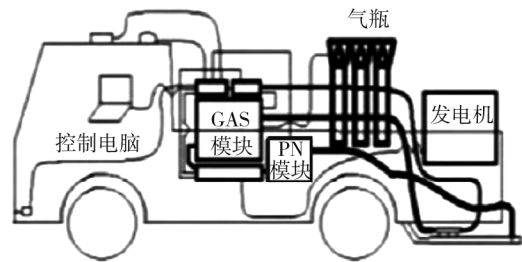


图 1 测试设备安装连接示意图

认证循环的 CO_2 比排放的数值; P_{\max} 为单位为 kW 的发动机最大额定功率的数值; $q_{m,i}$ 为单位为 g/s 的 CO_2 排放的瞬时质量流量的数值; T 为单位为 s 的数据采样周期的数值, $T=1$ 。

根据每个窗口的发动机负荷百分比将窗口分为 3 种类型: Bin1、Bin2、Bin3, 其中 Bin1 为怠速区, Bin2 为低负荷区, Bin3 为中高负荷区。3 个区的定义为: Bin1 区, $\eta_L \leq 6\%$; Bin2 区, $6\% < \eta_L \leq 20\%$; Bin3 区, $\eta_L > 20\%$ 。CARB 标准中, 负荷百分比计算公式中引用了发动机系族的美国联邦排放测试工况循环 (Federal test procedure, FTP) CO_2 排放认证结果, 本文中, 该结果采用我国 C-WTVC 认证循环的 CO_2 比排放替代。

3B-MAW 方法要求每个区的有效窗口数应至少为 2 400; 2B-MAW 方法要求 Bin1 窗口数至少为 2 400, Bin2 窗口数至少 10 000。2B-MAW 方法以 MAW 归一化的排放中平均 CO_2 的质量分数 $w(\text{CO}_2)$ 为分区划分依据: Bin1 区为怠速区, 定义为 $w(\text{CO}_2) \leq 6\%$; Bin2 区为非怠速区, 定义为 $w(\text{CO}_2) > 6\%$ 。归一化的平均 CO_2 排放率与式(1)中发动机负荷百分比的计算方法一致, 因此 2B-MAW 方法划分的 Bin2 分区, 从定义上可以理解为 3B-MAW 方法的“Bin2 与 Bin3 之和”。

按照 3B-MAW 试验方法, 如果任何区的有效窗口数不足 2 400, 应按需继续进行额外时间测试, 以达到每个区的最低窗口要求。如果在第 1 工作日或随后时间进行的试验满足低负荷和中高负荷区的有效窗口要求, 但不满足怠速区有效窗口要求, 可以在该工作日结束后使试验发动机怠速运行最少 40 min, 最多 60 min, 以满足怠速区的有效窗口要求。

基于以上描述, 为了理解 3B-MAW 方法车辆试验工况的负荷特征, 本文中采用 3 辆试验车辆, 按照 3B-MAW 的要求进行实际道路测试, 为保证每个区的窗口数, 每辆样车的试验均进行 2 个工作日。同时对样车 2 和样车 3 按国六标准要求, 进行 PEMS 试验, 并采用 3B-MAW 的数据分析方法分析样车的工况特性, 对比 2B/3B-MAW 和 PEMS 试验的工况特征。

2 试验结果

2.1 试验工况特征分析

3 辆样车的试验时间和窗口数如表 3 所示。

表 3 3 辆样车的试验时间和分区窗口数

车辆编号	试验时间	数据采集时间/s	有效数据/个	有效窗口数		
				Bin1	Bin2	Bin3
1	第 1 工作日	29 079	28 574	1 628	6 936	19 710
	第 1、2 工作日	60 139	57 684	3 449	14 896	39 039
2	第 1 工作日	26 144	25 265	1 285	11 628	12 052
	第 1、2 工作日	53 230	51 669	4 859	22 592	23 918
3	第 1 工作日	26 594	25 966	1 127	20 942	3 597
	第 1、2 工作日	50 614	49 757	2 201	41 716	5 540
	第 1、2 工作日 ^①	53 775	52 909	5 225	41 844	5 540

注: ①第 2 个工作日试验结束前, 发动机怠速运行 40 min。

由表 3 可知: 车辆 1、2 在完成第 2 个工作日的试验才满足 Bin1 的窗口数要求, 车辆 3 在第 2 个工作日试验结束前, 增加了 40 min 怠速时间, 才满足 Bin1 的窗口数要求; Bin2 和 Bin3 区, 窗口数在第 1 个工作日试验就已经基本满足甚至远超 2 400 的有效窗口数要求。本文中的 3 辆样车, 均按通常的使用习惯完成实际道路驾驶, 因此如果按照 3B-MAW 试验方法在本文中所选择的的城市道路开展试验, 满足怠速区的有效窗口数花费的试验时间较长。

试验样车遵循车辆的使用用途按通常运行路线开展的实际道路测试,行驶工况并未做特殊限定,考虑到完成 3B-MAW 试验所用的时间比较长,因此,采用概率分布的统计方法对比分析 3 辆样车的工况特征,3 台样车所有窗口负荷比和窗口平均车速的概率分布对比如图 2、3 所示。

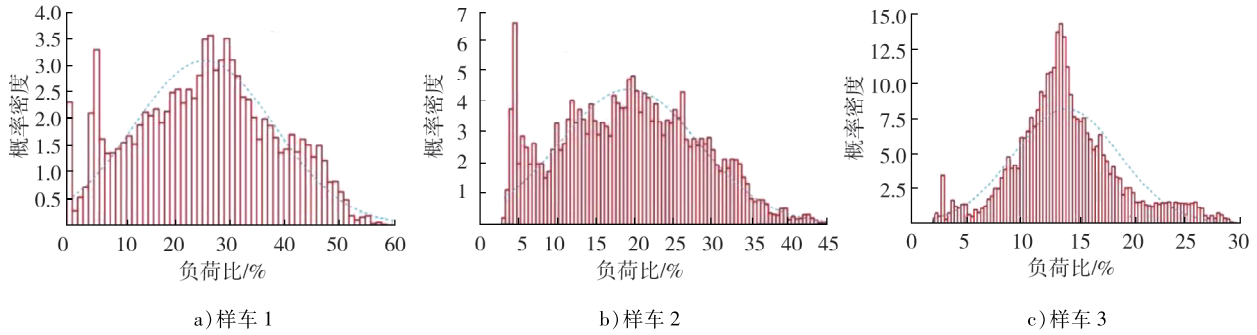


图 2 不同样车采用 3B-MAW 试验方法的负荷比概率密度

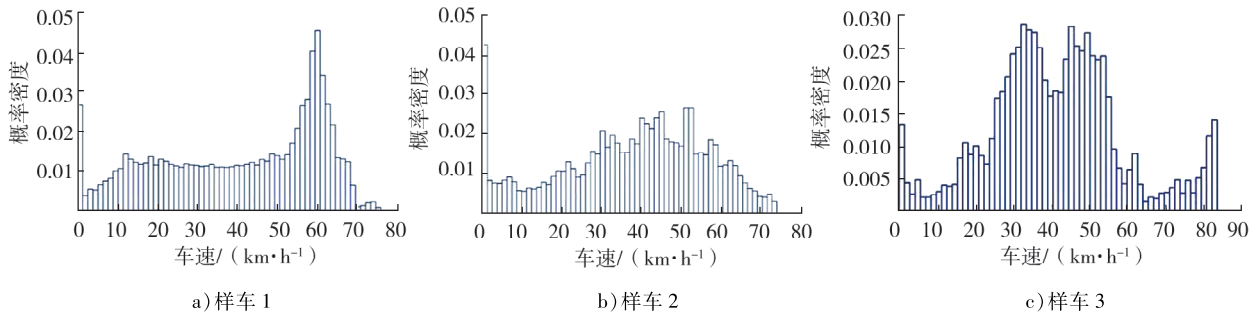


图 3 不同样车采用 3B-MAW 试验方法时的车速概率密度

由图 2 可知:3 辆样车的负荷比分布基本符合正态分布,只是样车 3 的概率峰值偏高,说明 3B-MAW 试验的车辆运行负荷变化遵循随机过程特征。

由图 3 可知:3 辆样车的车速概率分布没有体现典型分布特征,但平均车速分布相对比较均匀,基本覆盖所有车速范围,在某些车速范围出现峰值特征,说明 3B-MAW 试验的车辆运行车速能覆盖所有车辆正常的运行车速区间,根据车辆行驶路线和交通状况的不同,体现不同车速分布峰值特征。

对样车 2、3 按文献[1]中的试验方法完成 PEMS 试验,并采用 3B-MAW 方法进行数据分析,得到窗口负荷比和平均车速的概率分布对比,结果如图 4、5 所示。由图 4、5 可知,样车 2、3 的负荷比和车速均出现了明显的离散特征。这是因为文献[1]的 PEMS 试验方法规定了市区、市郊和高速 3 种工况,所以概率分布出现离散特征。从以上对比可以看出,3B-MAW 的试验方法相比于文献[1]的 PEMS 方法,工况覆盖相对更为全面。

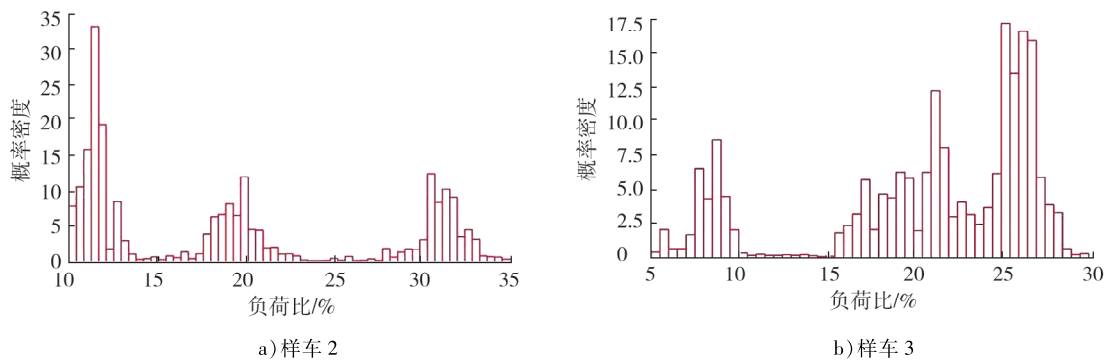


图 4 样车 2、3 按照 PEMS 试验方法的负荷比概率密度

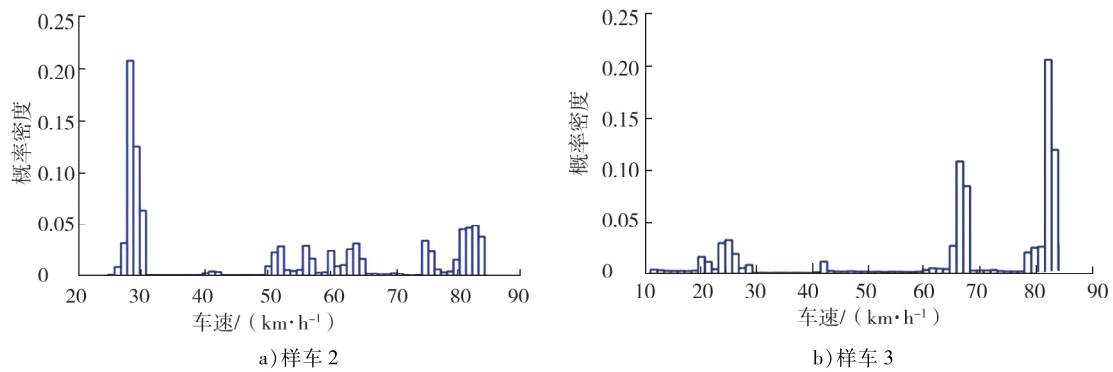


图5 样车2、3按照PEMS试验方法的车速概率密度

试验车辆3B-MAW试验负荷比和300 s内的车速的箱线图分布如图6所示。

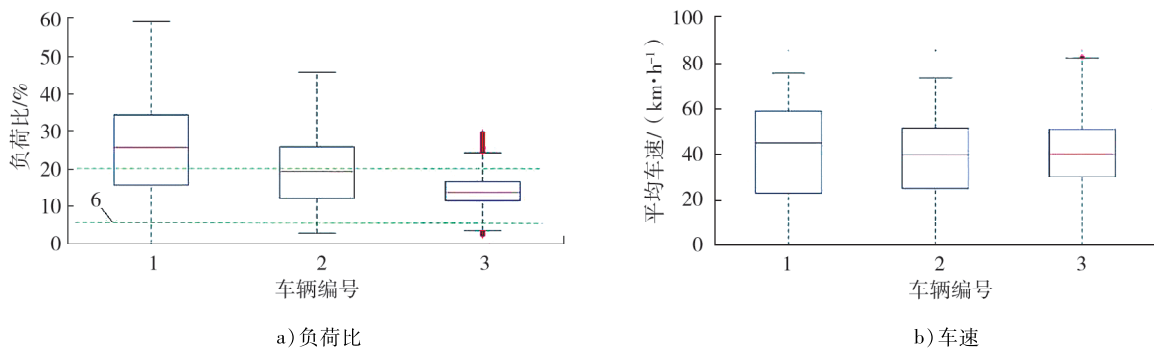


图6 3B-MAW窗口负荷比和300 s内的平均车速箱线图

由图6可知:负荷比和车速箱线图与图2、3的分布特征相对应,基本相对中位数对称,由于样车3的负荷比数据过于集中,因此在图6a)中表现有较多异常值;试验中3辆样车的负载和车速决定了最大负荷比均不超过60%,由于试验的负荷分布基本符合正态分布特征,车辆实际运行达到的最大负荷越低,相对应的负荷比低于20%所覆盖的窗口数据范围越大;本次试验3辆样车,负荷比为20%的箱线依次位于中位线以下(样车1)、接近中位线(样车2)、上四分位以上(样车3),负荷比低于6%的窗口占比很小,均在四分位数以下。因此,如果以负荷比为20%作为低负荷与中高负荷区的分界线,由于实际运行负载不同,不同车辆的Bin2和Bin3区窗口数可能差异很大。所以按照EPA的2B-MAW方法,将Bin2区和Bin3区合并,可能更加适合客观试验评价。

2.2 试验时间分析

根据以上试验,完成1组3B-MAW试验至少需要1~2个工作日,试验效率比较低。对3辆样车试验的试验数据分别截取3 h和6 h的数据,与总时间试验数据对比,研究不同试验时间窗口负荷比的概率分布。不同时间的负荷比累积概率分布如图7所示。

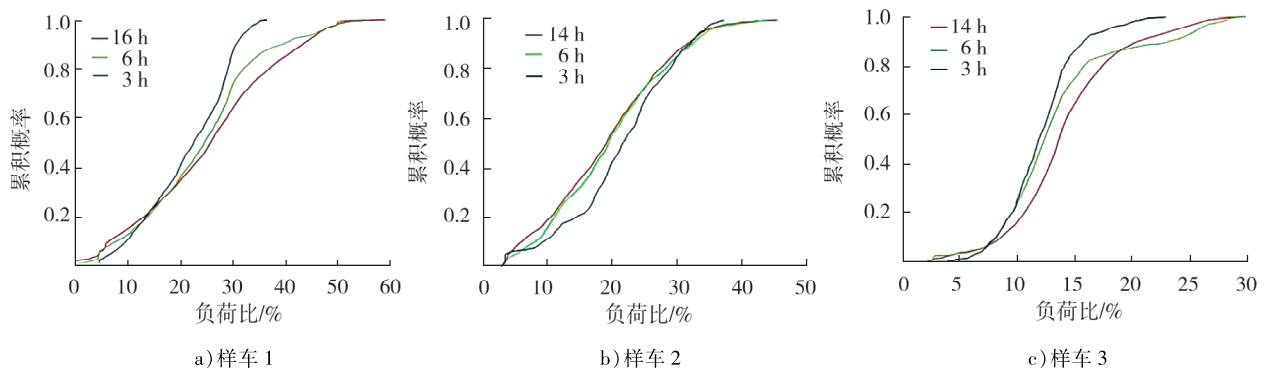


图7 不同车辆运行时间负荷比累积概率分布

由图7可知:相比样车3,样车1、2的总时间试验累积概率分布曲线更接近直线,也就是说窗口负荷比概率分布越符合正态分布,其累积分布曲线越接近直线;相比于总时间,6 h的累积曲线变化不大,与总时长的累积曲线变化基本一致,但如果试验时间缩短至3 h,累积分布曲线出现较大变化。因此试验时间越长,试验车辆的负荷分布越符合正态分布特征,更能代表实际道路测试时车辆运行的随机事件属性。但增加试验时间对于试验结果的影响是非线性的,本文中研究表明,试验时间不少于6 h基本能够满足车辆工况负荷充分随机的试验目标。

3 结论

1)3B-MAW方法的典型特征为通过长时间试验使车辆运行工况的分布更符合随机事件特征,能够更好地代表车辆实际运行情况;由于3阶段工况的区分,导致PEMS试验非典型的试验工况分布,负荷和车速概率分布变化离散。

2)不同试验车辆实际道路试验时,最高负荷差异较大,因此选择负荷率为20%作为低负荷区与中、高负荷区的分界点;当涉及某个具体试验车辆的试验结果时,出现低负荷区和高负荷区的窗口数差异非常大的问题,因此EPA的2B-MAW方案中,将3Bin中的Bin2和Bin3区,合二为一作为非怠速区统一评价排放,也许更符合车辆的实际情况。

3)改变采样试验时间直接影响车辆道路试验时的负荷比分布特征,试验时间不少于6 h,基本能够覆盖车辆的随机工况特征。

参考文献:

- [1] 生态环境部. 重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段):GB 17691—2018[S]. 北京:中国环境科学出版社,2019.
- [2] WANG A J, GE Y S, TAN J W, et al. On-road pollutant emission and fuel consumption characteristics of buses in Beijing[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011,23(3): 419-426.
- [3] KRISHNAMURTHY M, GAUTAM M. Comparison of averaging techniques employed in calculating not-to-exceed emissions for heavy-duty vehicles[C]//Proceedings of 2005 SAE World Congress. Detroit, USA:SAE International,2005.
- [4] VELDERS G J M, GEILENKIRCHEN G P, LANGE R D. Higher than expected NO_x emission from trucks may affect attainability of NO_2 limit values in the Netherlands[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(18): 3025-3033.
- [5] LIGTERINK N E, TAVASSZY L A, LANGE R D. A velocity and payload dependent emission model for heavy-duty road freight transportation[J]. *Transportation Research Part D: Transport & Environment*, 2012, 17(6): 487-491.
- [6] JOHNSON T V. Review of vehicular emissions trends[J]. *SAE International Journal Engines*, 2015,8(3): 1152-1167.
- [7] 葛蕴珊,王爱娟,王猛,等. PEMS用于城市车辆实际道路气体排放测试[J]. *汽车安全与节能学报*, 2010,1(2): 141-145.
- [8] 钟祥麟,李腾腾,于全顺,等. 运行工况对城市车辆PEMS测试的影响[J]. *内燃机与动力装置*, 2022,39(5): 60-66.
- [9] European Commission. Euro 7. Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council on type-approval of motor vehicles and engines and of systems, components and separate technical units intended for such vehicles, with respect to their emissions and battery durability (Euro 7) and repealing Regulations (EC) No 715/2007 and (EC) No 595/2009[S]. Brussels,Belgium:European Commission, 2022.
- [10] Environmental Protection Agency. Control of air pollution from new motor vehicles: heavy-duty engine and vehicle standards:EPA-HQ-OAR-2019-0055[S]. Washington D C, USA:EPA,2022.
- [11] California Air Resources Board. California exhaust emission standards and test procedures for 2004 and subsequent model heavy-duty diesel engines and vehicles[S]. Sacramento,USA:California Air Resources Board, 2020.
- [12] 杨保华,杜骞,崔焕星,等. 基于 CO_2 窗口法的在用柴油公交车 NO_x 排放评估方法研究[J]. *柴油机设计与制造*, 2020,26(2): 35-39.
- [13] 吕立群,尹航,王军方,等. 基于功基窗口法的国六重型柴油车实际道路排放研究[J]. *中国环境科学*, 2021,41(8):

- 3539–3545.
- [14] 陈剑杰,宋国富,李春敏,等. 基于窗口平均值法的高原环境下柴油车 NO_x 排放研究[J]. 汽车技术, 2018 (7): 32–35.
- [15] 景晓军,任烁今,汪晓伟,等. 重型车下阶段排放法规基本思路与发展趋势[J]. 汽车安全与节能学报,2023,14(2): 133–156.

Study on PEMS test cycle based on 3B-MAW method

ZHONG Xianglin, LI Tengting, ZHANG Chao, YU Quanshun

CATARC Automotive Test Center (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300300, China

Abstract: To study the differences between the 2 bin/3 bin moving average window (2B/3B-MAW) method in the United States and the portable emission measurement system (PEMS) method in China, three vehicles are selected to conduct testing and data analysis according to the 3B-MAW testing method. Two of the vehicles are tested according to CHINA 6, and the operating characteristics and differences of the vehicles under different testing methods are compared and analyzed. The results show that the probability distribution of the actual vehicle running condition tested by the 3B-MAW testing method conformed to the characteristics of random events. When combining low-load-bin with medium/high-load-bin for assessment, it is more in line with the actual operating conditions of the vehicle. The test time shall not be less than 6 h, which could represent the random characteristics of vehicle operation.

Keywords: heavy duty vehicle; PEMS; 2B/3B-MAW; operating conditions; probability distribution

(责任编辑:刘丽君)

.....

(上接第 12 页)

Experimental study on the effect of lean burn and EGR on thermal efficiency of gasoline engine

CHEN Zhifang, XI Xing, WU Xiaojun, XU Chunlong, YANG Guichun,

LI Chunhui, GU Jiaojiao

China North Engine Research Institute (Tianjin), Tianjin 300400, China

Abstract: An experimental study is conducted on a 4-cylinder 2.0 L gasoline engine to investigate the effects of excess air coefficient, effective compression ratio, and exhaust gas recirculation (EGR) rate on engine fuel consumption and thermal efficiency. The results show that the use of lean burn technology can improve the thermal efficiency of the engine, the engine thermal efficiency increases by approximately 5.7% when the excess air coefficient increases from 1.0 to 1.6, however, further dilution would increase fuel consumption and reduce thermal efficiency. The engine has the highest thermal efficiency of 44.1% when effective compression ratio is 12.7, but further increase in compression ratio will cause engine knocking, which requires delaying the ignition time, which can lead to an increase in combustion duration and a decrease in engine thermal efficiency. In addition, the EGR rate(4.6%) could achieve the highest thermal efficiency, 44.4%, but unstable combustion and misfire will occur in the engine when EGR rate increased further.

Keywords: lean burn; EGR; intake cam phase; gasoline engine; thermal efficiency

(责任编辑:刘丽君)