

西安市 CNG 燃料公交客车气耗测试行驶工况模拟

闫晟煜, 肖润谋

(长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064)

摘要:为了建立 CNG 燃料公交车燃料消耗量测试模拟方法,以西安市公交 A 线路为例,提出了运用运动微片段来匹配循环模拟工况,通过采集得到的实时车速谱及运营数据,以站间平均技术速度划分模拟工况,将整个往返行程分为 3 种模拟工况:畅通工况、拥堵工况、怠速工况,继而提取了平均稳定车速、拥堵工况最高车速、停车怠速时间等模拟参数,根据公交 A 线路的运营环境和车辆在无干扰、定载情况下测试的平均加速度,描述了测试现场的布置情况,提出了气耗的精确测试需要考虑气体压强与温度,最后,将模拟工况实车测试结果与 2 个车况相同的测试车辆运营数据进行比较。研究结果表明:模拟工况与实际运营状态的平均加速度偏差率约为 5%;每辆测试车辆与其在运营时的耗气量偏差率均在 2% 以内;模拟工况下测试车辆 1 比测试车辆 2 多耗气 1.85%,运营状态下多耗气 2.15%,属同趋势变化,验证了模拟方法的稳定性和一致性。

关键词:汽车工程;模拟工况;测试比较;CNG 燃料公交客车;燃料消耗量

中图分类号:U469.7

文献标志码:A

Development of driving cycle of Xi'an bus and CNG consumption verification

YAN Sheng-yu, XIAO Run-mou

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to explore a driving cycle on fuel consumption testing for CNG powered buses, this paper put forward that the driving cycle could be matched from motion micro-clips by taking line A of Xi'an as an example. Using spectrum of instantaneous velocity and operation data collected, this paper divided the round trip into 3 driving micro-cycles according to average velocity: unblocked cycle, blocked cycle, idle cycle. To be accurate, it extracted some simulation parameters such as average steady velocity, maximum velocity of the blocked cycle, idle time, and so on. According to the operating environment of line A and the average acceleration for fixed loads without interferences, the layout of testing field was described. Furthermore, it proposed that accurate testing need to take the pressure and temperature of CNG into account. The conclusion of driving cycles and comparison of operation data derived from the same two buses show that the deviation rate of the average acceleration is about 5%; the deviation rate of the

CNG consumption of both buses are less than 2% either under the condition of driving cycles or operation; the 1st bus consumes more CNG than the 2nd bus by 1.85% under the condition of driving cycle in addition, 2.15% of CNG consumption under the condition of operation indicates that they have a same tendency. Of course, it also indicates stability and homogeneity of the driving cycles. 5 tabs, 6 figs, 16 refs.

Key words: automobile engineering; driving cycle; comparison test; CNG powered bus; fuel consumption

0 引言

CNG 燃料以其优越的燃气经济性,较好的环保效果被广泛采用。公交车运营时的燃气消耗量测试主要受车辆情况、驾驶技术、运营环境的影响,然而,实际运营状况复杂多变,特别是当 2 辆公交车作气耗比较时,由于常常无法满足运营环境完全一致,导致气耗测试结果有失公允。所以,寻求一种模拟实际运营状况下的气耗测试方法显得尤为重要。美国、欧洲均采用多工况循环方式测试公交客车燃料消耗量^[1],但其公交车速度普遍偏高,相邻站间运行时间稳定,其测试方法有一定的借鉴意义^[2],特别是法国公交车辆行驶工况按照拥堵车流与自由车流划分,与中国关于模拟工况的分析存在相似之处。中国 2001 年发布的《商用车燃料消耗量试验方法》(GB/T12545.2—2001)中,多工况循环燃料消耗量试验方法是基于车辆样品测试的角度提出的^[3],但运营状态下公交线路存在限速区段,公交车多在 2、3、4 挡位行驶,车速不高,而且该标准实施难度大,不能完全满足运营时气耗测试的需要。城市公交车辆循环工况模拟方法方面,刘明辉等对北京典型的 40 条公交线路进行了实车测试,提出了一种多条线路循环工况的合成方法^[4];曹福灵等提出了一种基于 GIS 电子地图分析公交车行驶工况的方法^[5];骆元等提出了武汉市公交车运行工况的特点,在研究平均加速度、怠速时间、平均速度等工况指标的基础上,提出了评价混合动力公交车性能应根据具体城市公交工况特点的论点^[6-7]。以上研究多为从加速、减速等行驶状态的角度分析运营高峰与平峰时段对公交车气耗测试与比较,针对性和适用性不强,也鲜见采用 CNG 公交车燃气消耗量的方式衡量行驶工况模拟方法的可靠性。

基于此,为满足同一公交线路内车辆气耗测试比较分析的需要,开发了符合具体线路运营特征的模拟工况,提出了气体燃料消耗量测试时需要注意的问题,对 CNG 消耗量和尾气排放等测试具有一

定的参考价值,同时对实际运营情况的掌握有利于公交线路车辆的结构调整和调度日程编排。

1 测试模拟方法

1.1 基本原理

规定公交车在站间行驶过程中,单次起步到停车的过程为一个运动片段。将公交车辆整个往返行程分解为若干个运动片段,每个运动片段互有不同,见图 1。

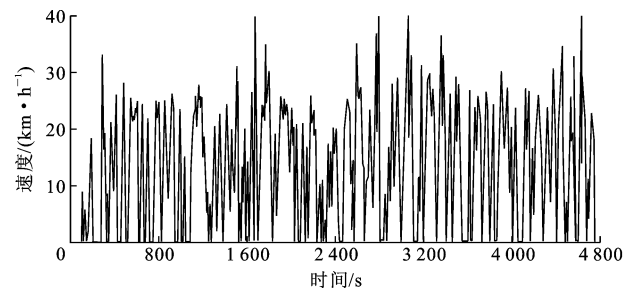


图1 西安市某典型公交线路单程实时车速情况

Fig. 1 Instantaneous velocity of typical line in Xi'an city

通过对运营时段车速与时间的调查,显现出该公交线路的运行一致性,形成几种运动微片段,假设每个运动片段由微片段构成,整个往返行程将会是这几种微片段组合方式与匹配的问题,即个数或比重的问题。

1.2 运营信息采集

需要采集的运营数据有进出站时间、上下车人数、站间距、遇信号灯停车时间、换挡规律、实时车速、空调温度、气耗值、气耗测试管路的气体气压和温度等。高峰时段不可控因素多,客运量波动大,道路拥挤状况不稳定,所以以平峰时段为数据采集对象。车辆遇红灯停车为偶发事件,模拟测试过程中车辆在无信号灯的通路上行驶。

1.3 数据处理

运动微片段有 3 种:畅通工况、拥堵工况、停车怠速工况。畅通工况包括加速、匀速、减速过程;拥堵工况仅包含加速、减速过程;停车怠速工况则包含了站内停车上下客时间和遇信号灯停车时间^[7]。畅

通工况与拥堵工况是从行驶里程角度刻画的,而停车怠速工况需要从怠速时间角度去描述,将站间行驶时遇信号灯停车时间累加到站内停车怠速时间。模拟工况如图 2 所示。

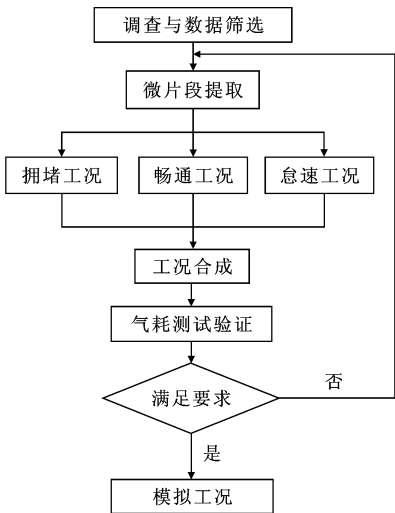


图 2 模拟工况形成过程
Fig. 2 Formation of driving cycle

畅通工况的特点是车辆从起步加速到某一车速后,若非特殊情况发生,车速会相对稳定在某个范围,出现一种“类匀速”的情况,靠近公交站时再减速滑行;拥堵工况的特点是车辆加速一段时间后会直接减速,中间没有类匀速的过渡行驶工况。从实际运营状态下采集的典型工况的速度-时间曲线,见图 3。

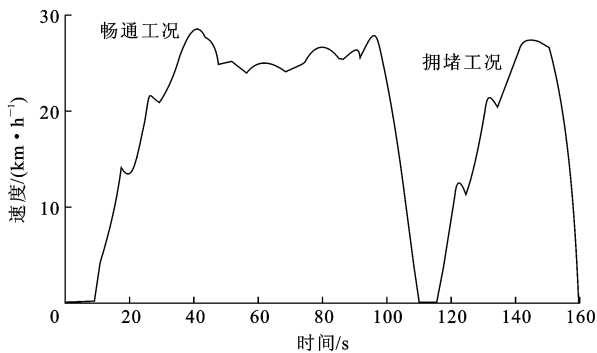


图 3 典型的畅通工况与拥堵工况的组合

Fig. 3 A typical combination of unblocked cycle and blocked cycle

模拟的关键是公交车在运营状态下,找到畅通工况下平均稳定车速和相应的运行距离,以及平均加速度、平均制动减速度;找到拥堵工况下的最高车速、平均加速度、平均制动减速度;找到往返行程内总停车怠速工况时间。

同时也注意到无论拥堵工况和畅通工况在加速过程中,速度图像上都会有“毛刺”出现,而减速过程没有出现,是因为车辆在换挡加速过程中,动力切断,受阻力影响车速稍稍放缓,是正常现象,所以在测试平均加速度时,应将动力切断时间考虑进去。

定义从某一公交站点起步出发到相邻下一公交站点停车到达的站间平均速度为平均技术速度,信号灯引起的怠速延误不计算在内。当站间平均技术速度小于站间所属区段最高车速的一半时,为拥堵工况,反之为畅通工况。遇跨区站间取最高限速较小值。

2 西安市公交线路模拟

2.1 运营环境

目前,西安地区公交车 CNG 燃料覆盖率在 98% 以上^[8]。公交 A 线路需要进行气耗测试,该线路往返行程 37.72 km,调查在平峰时段内进行,分布于上午、下午、夜间。西安市区内公交车辆限速大致分为 3 个区段:城墙内,30 km/h;城墙与二环间,35 km/h;二环外,40 km/h。部分路段在车流量大的时候按通行时段限速,但这种限速对测试模拟影响较小,不予考虑。经过多次调查获得该线路特征指标,调查结果见表 1。

表 1 中平均技术速度的计算除去了遇信号灯的停车时间,也不包括站内停车怠速时间^[9]。由表 1 可知,全天内 A 线路平均技术速度为 17.56 km/h,速度不高,究其原因为 A 线路低挡位利用率高,平均空挡滑行率为 23.29%,2 挡利用率为 29.29%,3 挡利用率为 30.63%,合计 83.21%。低挡位行驶气耗量大。

2.2 模拟工况参数

由调查得到的进出站时间、站间距可得到站间

表 1 A 线路运营情况基本参数

Tab. 1 Fundamental operating parameters of line A

调查时段	平均站内怠速时间/s	平均客流量/人	平均技术速度/ (km·h ⁻¹)	挡位利用率/%			
				空挡	2 挡	3 挡	4 挡和 5 挡
9:00~12:00	11.75	157	17.17	18.20	26.12	35.12	20.56
14:00~17:00	12.52	169	16.69	23.21	29.30	29.32	18.17
19:00~22:00	9.38	175	18.83	28.46	32.46	27.45	11.63

平均技术速度,与区段限速值相比较区分畅通与拥堵工况。平均稳定车速一般为单次连续加速终止后与减速滑行前的车速平均值。稳定车速平均运行距离可由实时车速谱得到。A 线路经划分后的模拟工况参数见表 2。

表 2 划分后的模拟工况主要参数

调查时段	畅通工况		停车怠速时间/s
	平均稳定车速/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	稳定车速平均 运行距离/m	
9:00~12:00	32.12	335.26	1 739
14:00~17:00	29.41	272.65	1 867
19:00~22:00	30.74	302.83	1 884

畅通路况下,公交车辆的稳定车速一般会接近区段限速值,但不会超过。表 2 中平均稳定车速是往返全程的计算结果,A 线路的平均稳定车速基本维持在 30 km/h 左右,稳定车速平均运行距离约 300 m;同时,稳定车速平均运行距离是通过大量的数据采集与统计才能够完成的,采集仪器具有较大的数据存储空间^[10]。停车怠速时间取平峰时段均值 30.5 min。

由于分段限速,需要计算出 A 线路往返工况分界点,来确定拥堵工况最高车速。通过 A 线路穿过限速划分区段的里程加权得工况分界点车速为 19.1 km/h,考虑到驾驶人测试时操作的便捷性,取整为 20 km/h。模拟稳定车速前的行驶距离可根据平均加速度与平均制动减速度测算,见表 3。

表 3 无干扰情况下 A 线路车辆的平均加速度与制动减速度

Tab. 3 Average accelerations and decelerations of line A without interferences			
分段限速/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	0~10	0~20	0~30
平均加速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	0.64	0.50	0.38
平均制动减速度/ ($-\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	0.68	0.71	0.73

平均制动减速度是在车辆行驶前方无干扰,车辆定载 30 人,并且制动平稳的情况下测试的^[11]。一般情况下,接近公交站时,车辆多是提前挂入空挡,减速滑行,少有再次加速的情况,所以在车辆前方无干扰的情况下,制动减速度相对比较稳定。

根据测算后的畅通工况平均稳定车速和拥堵工况最高车速,结合表 3 中的平均加速度,可计算畅通工况下的车辆加速距离为 91.37 m,减速距离为 43.47 m,为便于测试场地的布置,并且留给驾驶人充分的操作时间,分别取整为 100、50 m;拥堵工况下车辆的加速阶段和减速阶段行驶距离分别为

30.86、21.74 m,减速滑行时加速踏板完全释放,所以可将减速行驶距离适当延长,分别取为 40、30 m,即拥堵路况行程 70 m^[12]。

2.3 测试现场模拟

按照上述测算的工况参数,可进行测试现场的布置。见图 4。

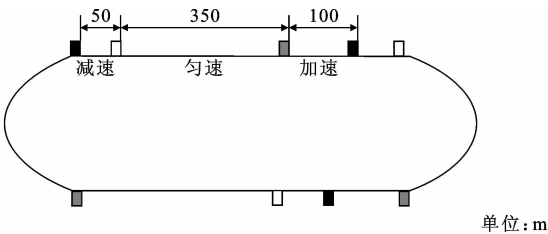


图 4 畅通工况测试现场布置

Fig. 4 Layout of testing field under unblocked cycle

图 4 中,黑旗代表停车,并且为加速起步的起点;灰旗代表加速过程结束,开始匀速;白旗代表匀速过程结束,开始减速,至黑旗停车。运行方向为逆时针。

拥堵工况为每隔 70 m 路侧设置起步和停车标志,起步后 40 m 设置减速白旗。

运营时公交 A 线路往返行程 37.72 km,通过对该线路实时车速谱的统计,平峰状态下畅通工况占行驶里程 90.03%,拥堵工况占 9.97%,停车怠速时间为 30.5 min,所以在测试模拟时,畅通工况应行驶 34.03 km,拥堵工况应行驶 3.77 km。由于单次畅通工况模拟行程 450 m,单次拥堵工况模拟行程 70 m,继而可折算为畅通工况 76 次,拥堵工况 54 次,怠速工况时间为 30.5 min。测试时以模拟工况循环为测试科目,并不将 3 种工况组合起来同时测试。

车辆到黑旗处记录实时气耗数据^[13]。CNG 燃料公交车的模拟工况当采用气耗值验证时,需要考虑气体压强和气体温度。根据理想气体状态方程,同一温度下气压越低,气耗值越大;同一气压下温度越高,气耗值越大。

3 结果分析

为保证测试公正,测试采用车况相同的 2 辆公交车。安装气耗仪并检查气密性,测试时控制流经气耗仪串联断面的气体压强和温度,保持 2 辆公交车的测试参数一致;安装实时车速采集仪,测试前经检查,车辆气瓶内气压基本一致,并对公交车进行空车称重。

2 辆车自重均为 11.83 t,发动机额定功率

177 kW。据调查,A 线路站间平均车上载客 29 人(不含驾驶人),则测试模拟时车上载人 30 人,人均质量 62.57 kg,空调温度设定为 25 ℃,轮胎与传动系统均为良好的测试状态。并且对运营数据进行统计与验证,2 辆公交车的气耗值相近。

测试现场实时车速谱与实际运营状态下相比较,基本保持一致,测试现场模拟时限制了拥堵工况的最高车速,多进行了一次降挡操作,导致减速过程略有差别,如图 5 所示。

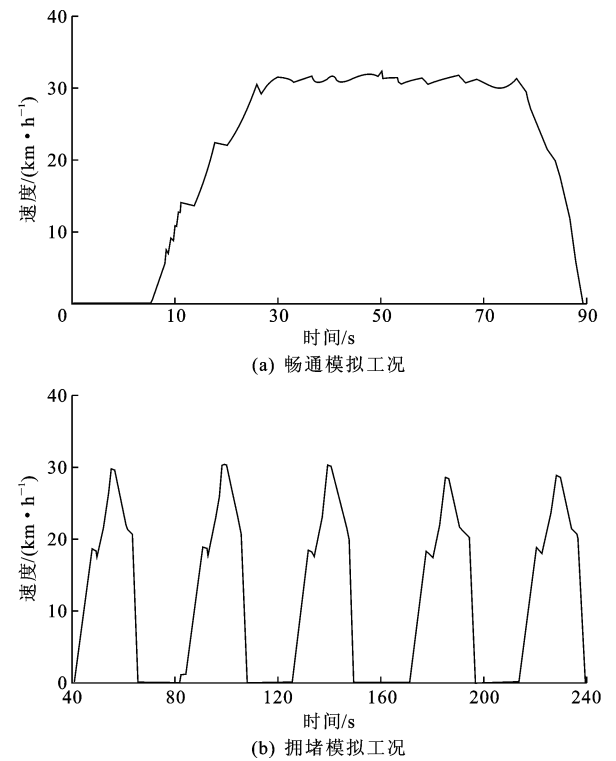


图 5 测试现场工况模拟

Fig. 5 Driving cycles on testing field

截取测试现场实时车速谱^[14],筛选数据,测算测试全程平均技术速度、平均加速度以及挡位利用率,见表 4。

表 4 中,由于车速由驾驶人把控,造成车速波动的原因很多,测试过程中驾驶人视线与仪表盘速度指针平面法线不完全重合,导致平均技术速度相对

表 4 测试现场基本参数

Tab. 4 Fundamental parameters of testing field

类别	平均技术速度/ (km · h ⁻¹)	平均加速度/ (m · s ⁻²)	挡位利用率/%			
			空挡	2 挡	3 挡	4 挡
测试车 1	18.40	0.36~0.38	25.66	25.38	36.11	12.85
测试车 2	18.96	0.36~0.39	24.83	24.95	36.86	13.36

于实际运营状态下的平均车速 17.56 km/h 偏高,但车速偏差值一直在可控范围 10% 以内。畅通工况下测得 0~30 km/h 车速的最小加速度为 0.36 m/s²,最大加速度为 0.39 m/s²,同运营时平均加速度 0.38 m/s² 的偏差量在±0.02 m/s² 以内,最大偏差率为 5.26%。平均稳定车速等工况参数会影响挡位利用率。高挡位利用率小,空挡、3 挡利用率高是 A 线路模拟工况的显著特点,因为运营时换挡频繁,所以挡位利用相对均匀一些。同气耗值关系较大的 2 挡、3 挡合计利用率与运营时相差不大。

测试现场模拟过程中,驾驶人不更换。驾驶人在保证驾驶操作的前提下,需要近似地保持规定速度(平均稳定车速、拥堵工况最高车速等),完全与规定速度无偏差是不可能的。测试现场记录的气耗数据,见表 5。

气耗仪串接点位置的气体压强是有范围规定的,可通过减压阀机械调整^[15-16],所以测试过程中只需控制温度,即可保证气耗值的可比性。根据表 5 中的气耗数据,2 辆测试车畅通工况下的平均气耗值为 18.35 m³,除怠速工况外,行驶工况的平均合计气耗值比重为 83.56%,与运营时的畅通工况行驶里程比重 90.03% 接近。测试现场模拟时 2 辆公交车气体压强偏差率为 1.45%,温度偏差率为 1.89%,均被控制在±2% 以内,大致认为 2 辆公交车气耗指标相同。测试现场模拟工况,测试车 1 耗气 24.8 m³,测试车 2 耗气 24.35 m³,与相应车辆运营时的气耗值 25.10 m³、24.67 m³ 相近,在±2% 的偏差率以内。

测试现场模拟过程中,2 辆公交车畅通工况下的气耗值偏差率为 2.37%,拥堵工况下的气耗值偏

表 5 测试现场记录的气耗数据

Tab. 5 CNG consumption data of testing field

气耗数据	测试现场模拟						实际运营	
	畅通工况		拥堵工况		怠速工况			
	测试车 1	测试车 2	测试车 1	测试车 2	测试车 1	测试车 2	测试车 1	测试车 2
气耗值/m³	18.56	18.13	3.61	3.62	2.63	2.61	25.20	24.67
气体压强/kPa	920.53	933.30	919.86	933.77	920.11	933.48	920.24	933.52
气体温度/℃	38.98	40.56	39.58	40.33	40.27	40.20	40.01	40.12

差率为0.28%,怠速工况下的能耗值偏差率为0.77%,偏差率均在 $\pm 3\%$ 以内,表明在测试条件相同的情况下,模拟方法没有对车况相同的2辆公交车的测试数据产生偏移波动,模拟方法的稳定性好。测试的能耗数据曲线如图6所示。

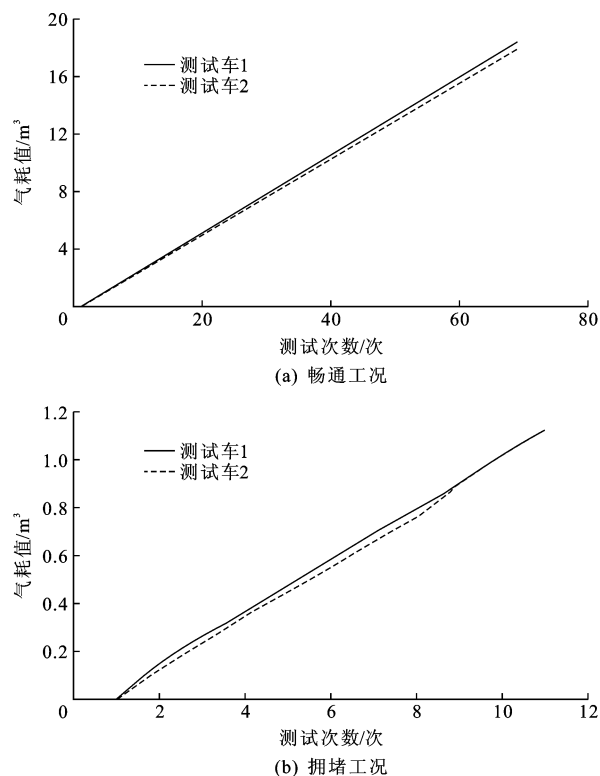


图6 测试车辆模拟工况能耗值对比

Fig. 6 Comparison on driving cycles of the two tested buses

图6中,无论畅通工况,还是拥堵工况,测试结果都呈现近似线性增长的趋势。单次测试时,2辆公交车在畅通工况下的最大偏差率为3.67%,拥堵工况下的最大偏差率为4.55%;测试车1与测试车2在模拟工况下的能耗值分别为24.8、24.35 m³,相当于测试车1比测试车2多耗气1.85%;而运营时,测试车1比测试车2多耗气2.15%,表明运营时不确定因素会干扰测试,且2辆车的能耗值同趋势增长,测试车1无论在何种测试条件下都比测试车2能耗值偏高,也说明了模拟方法与运营状态的一致性较好。综上,认为该模拟方法可行。

4 结 语

(1)提出了由特征运动微片段组合匹配模拟工况的思路,通过采集的实时车速谱与调查,以西安地区某典型公交线路为例,模拟了实际运营状态下的车辆行驶工况,并通过比较2辆CNG燃料公交车燃料消耗量的方式,验证了模拟方法的稳定性和一

致性。

(2)基于运营状态,采集了上下车人数、进出站时间、换挡规律、能耗数据等信息,有一定的现实性,测试方法流程简单,方便驾驶人配合测试操作,可靠性好,然而,不同线路的模拟方法可能不同。

(3)本文提出了一种仅针对某条公交线路的测试模拟方法,不能代表西安市全部公交线路的能耗对比试验模拟方法,有局限性,但也有一定的参考价值。

(4)运动微片段的类型是行驶工况模拟的根本,应通过实际运营调查与测试进一步拓展,同时,行驶工况模拟效果的评价方法也值得进一步研究。

参考文献:

References:

- [1] 朱俊虎. 城市公交车行驶工况的构建[D]. 合肥:合肥工业大学,2011.
ZHU Jun-hu. The city driving cycle construction[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [2] Mazloumi E, Moridpour S, Currie G, et al. Exploring the value of traffic flow data in bus travel time prediction[J]. Journal of Transportation Engineering, 2012, 138(4): 436-446.
- [3] GB/T 12545.2—2001, 商用车燃料消耗量试验方法[S].
GB/T 12545.2—2001, Commercial vehicle-fuel consumption test method[S]. (in Chinese)
- [4] 刘明辉, 赵子亮, 李 骏, 等. 北京城市公交客车循环工况开发[J]. 汽车工程, 2005, 27(6): 687-690.
LIU Ming-hui, ZHAO Zi-liang, LI Jun, et al. A study on the development of driving cycle for public buses in Beijing[J]. Automotive Engineering, 2005, 27(6): 687-690. (in Chinese)
- [5] 曹福灵, 郭明飞, 董红召. 城市公交车行驶工况分析方法研究[J]. 科技通报, 2013, 29(1): 102-109.
CAO Fu-ling, GUO Ming-fei, DONG Hong-zhao. Research on analysis method in driving cycles of urban buses[J]. Bulletin of Science and Technology, 2013, 29(1): 102-109. (in Chinese)
- [6] Koshy R Z, Arasan V T. Influence of bus stops on flow characteristics of mixed traffic[J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 131(8): 640-643.
- [7] 骆 元, 王 杰. 武汉城市公交车工况测定及分析[J]. 机械工程学报, 2005, 41(12): 96-100.
LUO Yuan, WANG Jie. Testing and analysis of driving cycle for Wuhan city bus[J]. Chinese Journal of

- Mechanical Engineering, 2005, 41(12): 96-100. (in Chinese)
- [8] 陈宽民, 王建军, 殷建军. 西安市公共交通现状分析及战略规划[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2002, 22(6): 69-74.
CHEN Kuan-min, WANG Jian-jun, YIN Jian-jun. Strategic plan and current situation analysis of public transit in Xi'an city[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2002, 22(6): 69-74. (in Chinese)
- [9] 张全, 靳文舟. 大城市公交车行驶工况研究中的实验路线选择[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2005, 33(4): 59-62.
ZHANG Quan, JIN Wen-zhou. Selection of experimental routes for the investigation into bus driving cycles in big cities[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2005, 33(4): 59-62. (in Chinese)
- [10] 陆艺, 郭斌, 赵静, 等. 基于高速数据采集的离合器踏板特性测试系统[J]. 汽车技术, 2011(9): 48-51.
LU Yi, GUO Bin, ZHAO Jing, et al. Testing system of clutch pedal characteristics based on high speed data acquisition[J]. Automobile Technology, 2011(9): 48-51. (in Chinese)
- [11] 刘浩学, 林彩霞, 马强骏, 等. 基于台架检测汽车滑行距离的修正模型[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(2): 88-90.
LIU Hao-xue, LIN Cai-xia, MA Qiang-jun, et al. Revising model of automobile coast-down distance on bench test[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(2): 88-90. (in Chinese)
- [12] 孙宏图, 宋希庚, 王天玲. 改进的城市公交循环工况开发方法[J]. 大连理工大学学报, 2009, 49(6): 837-841.
SUN Hong-tu, SONG Xi-geng, WANG Tian-ling. Improved method of driving cycle construction for urban bus[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2009, 49(6): 837-841. (in Chinese)
- [13] 王爱娟, 葛蕴珊, 谭建伟, 等. CNG 公交车燃气消耗预测的研究[J]. 汽车工程, 2011, 33(3): 241-245.
WANG Ai-juan, GE Yun-shan, TAN Jian-wei, et al. A study on the prediction of gas consumption of CNG buses[J]. Automotive Engineering, 2011, 33(3): 241-245. (in Chinese)
- [14] Zhang C, Teng J. Estimating bus travel speed under information collection environment[C]//ASCE. International Conference on Transportation Engineering, Chengdu: ASCE, 2013: 2149-2156.
- [15] 蒋黎明. LNG 客车供气系统安装技术研究[J]. 客车技术与研究, 2011(5): 26-29.
JIANG Li-ming. Research on installation technology of bus LNG supply system[J]. Bus & Coach Technology and Research, 2011(5): 26-29. (in Chinese)
- [16] 杨延相, 杜红, 刘昌文, 等. 用于汽车道路行驶排放测量的车载实验系统[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2002, 22(4): 62-65.
YANG Yan-xiang, DU Hong, LIU Chang-wen, et al. An on-road measurement system for vehicle road emission[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2002, 22(4): 62-65. (in Chinese)