

在用国IV公交车燃用B5生物柴油的排放特性

胡志远, 谢亚飞, 谭丕强, 楼狄明

(同济大学汽车学院, 上海 201804)

摘要: 以一辆满足国IV排放的柴油公交车为试验样车, 在重型底盘测功机上分别进行燃用柴油和B5生物柴油的中国典型城市公交车循环(CCBC)排放特性试验, 分析了该车燃用B5生物柴油CCBC循环的气态物和颗粒物排放特性。结果表明: CCBC循环的发动机工况主要集中在 $900\sim 1\,100\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $200\sim 500\text{ N}\cdot\text{m}$, 呈明显的低速、中低负荷特征; 该车燃用柴油和B5低速行驶的总碳氢(THC)和 NO_x 、颗粒质量(PM)和颗粒数量(PN)单位里程排放因子较高, 高速行驶的CO单位里程排放因子较高。与柴油比较, 该车燃用B5的THC和 NO_x 排放增加, CO和PM排放降低, PN排放基本相当。其中, 车辆怠速、中低速加速行驶的THC排放率较高, 中低速加速行驶的 NO_x 排放率相对较高, 中高速加速、高速匀速行驶的PN较多是导致该车燃用B5的THC、 NO_x 和PN增加的主要原因。除低、中速加速CO排放较高, 低速加速/减速/匀速PM排放率较高之外, 其他工况的CO和PM排放降低是导致该车燃用B5的CO和PM降低的主要原因。

关键词: 在用国IV公交车; B5生物柴油; 中国典型城市公交车循环; 排放

中图分类号: U467.1⁺1

文献标志码: A

CO emission factor is higher at high speed. Compared with diesel, the THC and NO_x emission of biodiesel is increasing, while the CO and PM emission is decreasing, and the PN emission of B5 is almost the same with diesel. On the working conditions of idle and middle-low speed acceleration the THC emission rate becomes higher, while the NO_x emission rate is higher on the working conditions of middle-low speed acceleration. PN emission rate is much higher on the working conditions of middle-high speed acceleration and high uniform speed. That's the reason why THC, NO_x , PN emission rates of B5 increase. Except for the higher CO emission rate during middle-low speed acceleration and higher PM emission during low-speed acceleration, deceleration and uniform speed, CO and PM emission on the other working conditions is lower. That's the main reason why CO and PM emission of B5 decreases under CCBC.

Key words: in-use China four diesel bus; biodiesel B5; China City Bus Driving Cycle(CCBC); emission

Emission Characteristics of an In-use China Four Diesel Bus Fueled with B5

HU Zhiyuan, XIE Yafei, TAN Piqiang, LOU Diming

(College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The characteristics of particulate matter and gaseous emission from a China-IV diesel bus burning diesel and biodiesel with 5% blend ratio were tested on heavy chassis dynamometer under China City Bus Driving Cycle (CCBC). The results indicated that the bus working condition under CCBC is mainly during $900\sim 1\,100\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ and $200\sim 500\text{ N}\cdot\text{m}$, which shows the characteristics of low speed and middle-low load. The total hydrocarbon (THC), NO_x , particulate matter (PM) and particulate number (PN) emission factor of diesel and biodiesel is higher at low speed, while the

2015年1月1日起,我国全面实施国IV柴油标准,满足国IV标准的柴油公交车被广泛用于上海等大城市。由于运行环境的特殊性,公交车处于频繁启动、制动、怠速和低速行驶工况,其实际运行工况与ETC工况存在较明显的差异^[1]。另一方面,柴油公交车作为城市重要的公共交通工具需要消耗巨大的能源,同时又产生大量的污染物排放,例如:上海中心城区公交车氮氧化物(NO_x)、颗粒物排放分担率分别为37.6%和45%^[2]。采取措施,实现在用公交车的节能减排是目前的研究热点。

生物柴油是以油料作物、废弃油脂等为原料通过酯交换工艺制成的液体燃料,具有十六烷值高、润滑性好、可再生性等优点^[3-4],无需改动柴油机可直接使用^[5]。发动机台架试验研究表明:柴油机燃用生物柴油后的一氧化碳(CO)、碳氢化合物(HC)、颗粒

物(PM)等排放降低,多环芳烃(Polycyclic Aromatic Hydrocarbon, PAHs)降低且等效毒性下降^[6-7]. 由于公交车实际道路行驶时发动机的负荷和转速集中区域与现阶段发动机台架试验欧洲瞬态工况(European Transient Cycle, ETC)循环工作区域不完全相同^[8-9],发动机台架试验结果不能完全代表车辆的实际道路排放特性,如何客观评价在用国IV柴油公交车使用B5的排放特点是亟待解决的问题.

采用便携式排放测试系统(Portable Emission Measurement System, PEMS),测量车辆的实际道路排放是目前国内外学者评价车辆实际道路排放的主要研究手段之一. Shauna Hallmark^[10]等采用PEMS对公交车进行实际道路CO, HC, CO₂和NO_x排放测试,胡志远^[11]等对上海市国IV公交车的实际道路NO_x和颗粒排放特性进行了研究,谭丕强^[12]等对公交车燃用生物柴油后主干道、次干道路等不同道路类型的CO, THC, NO_x等排放特性进行了研究,楼狄明等^[13]对国IV公交车燃用生物柴油的实际道路颗粒数量排放特性进行了研究. 但是,受试验环境、路线、驾驶行为的影响,公交车实际道路排放测量具有随机性强的特点,须进行大样本试验才能部分表征车辆的实际道路排放特点.

重型车底盘测功机试验可以根据特定的驾驶循环,在特定的环境下对公交车进行排放性能试验,具有试验结果稳定性、一致性和代表性好的特点,可同时避免发动机台架试验和车辆实际道路试验结果代表不强的缺点,成为国外学者研究重型车排放和油耗性能的主要手段. Jonathan Burton^[14]等利用重型转毂比较纽约循环(NY Comp)、重型车驾驶循环(Heavy Heavy-Duty Diesel Truck Drive Cycles, HHDDTT)下重型卡车的排放和经济性. Muralidharan M^[15]等采用ELPI(Electrical Low Pressure Impactor)和烟度计,在重型车转毂上研究生物柴油公交车燃用B5新德里公交驾驶循环(Delhi Bus Driving Cycle, DBDC)的烟度和颗粒数量排放特性. Nigel Clark^[16]等比较了公交车燃用生物柴油橘郡循环(the Orange County Transit Authority Driving Schedule, OCTA)和城市驾驶循环(the Urban Dynamometer Driving Schedule, UDDS)的经济性及排放特性. 国内学者亦开始利用重型车转毂研究其经济性、排放性的相关研究,例如:王燕军^[17]等研究了重型柴油车在重型车实际道路行驶工况(VECC)循环和重型商用车瞬态车辆循环(China World Transie Vehicle Cycle, C-WTVC)

的CO, HC, NO_x和CO₂排放特性,李腾腾^[18]等研究了混合动力客车运行中国典型城市公交循环(China City Bus Cycle, CCBC)循环和C-WTVC排放及油耗. 但有关公交车燃用生物柴油的相关研究仍为空白.

本文以满足国IV排放的柴油公交车为试验样车,在重型底盘测功机上研究该车燃用柴油、柴油-生物柴油混合燃料B5在CCBC循环的CO, THC, NO_x, CO₂, PN和PM的排放特性,为客观评价在用国IV柴油公交车使用B5的排放特点提供参考依据.

1 试验方案

1.1 试验样车及燃料

试验样车为一辆满足国IV排放的柴油公交车,安装高压共轨六缸增压中冷柴油机,其主要技术参数如表1.

表1 试验样车主要技术参数

项目	参数
发动机额定功率(kW)/转速(r·min ⁻¹)	213/2 300
发动机最大扭矩(N·m)/转速(r·min ⁻¹)	1 200/1 200~1 700
发动机排量/L	7.146
最大设计总质量/kg	17 500
整备质量/kg	11000
进气方式	增压中冷
长/宽/高/mm	11 880×2 500×3 150
排放	国IV

试验燃料为柴油、柴油与废弃油脂制生物柴油按5%体积比混合的柴油-生物柴油混合燃料(B5),柴油及B5的主要理化指标如表2所示.

表2 柴油与B5理化指标

项目	柴油	B5
十六烷值	53.3	54.4
20℃密度/(kg·m ⁻³)	813.2	839.0
20℃运动粘度/(mm ² ·s ⁻¹)	3.59	4.93
S含量/(mg·kg ⁻¹)	2.9	7.1
O质量分数/%	—	2.42
C质量分数/%	86.12	85.62
H质量分数/%	13.84	13.77
低热值/(MJ·kg ⁻¹)	43.96	43.75

1.2 试验装置及循环

试验装置包括MAHA-AIP重型底盘测功机,日本HORIBA公司OBS-2200气态排放测试仪,芬兰Dekati公司的静电低压冲击仪ELPI,及FPS-4000稀释通道等辅助设备. 试验装置如图1所示.

HORIBA 公司 OBS-2200 包括 CO 分析计、CO₂ 分析计、THC 分析计和 NO_x 分析计,量程(体积分数)分别为 0~10%,0~20%,0~10 000×10⁻⁶和 0~3 000×10⁻⁶,其误差为±2.5%。Dekati 公司的 ELPI 分辨率为 1 Hz,量程为 7 nm~10 μm,包括 12 个通

道。Pitot 管式流量计量程为 0~20 m³·min⁻¹,流量精度±1.5%。

试验循环采用 GB/T19754-2005 推荐的中国典型城市公交车循环(CCBC),如图 2 所示。为消除驾驶员操作随机性因素,试验时循环重复进行 5 次。

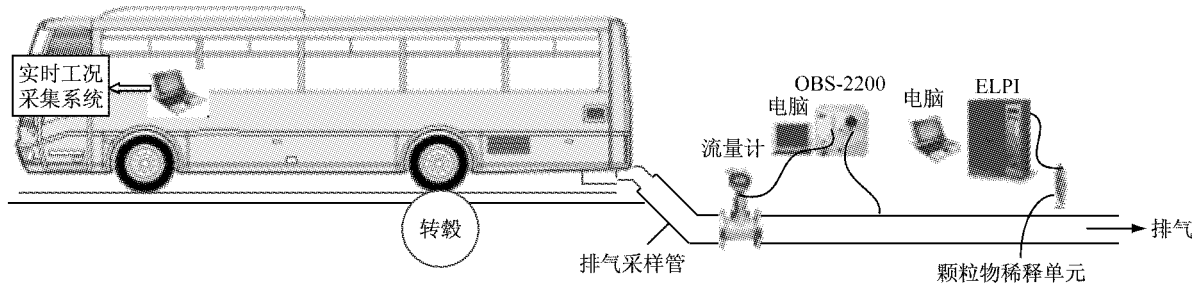


图 1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of PEMS

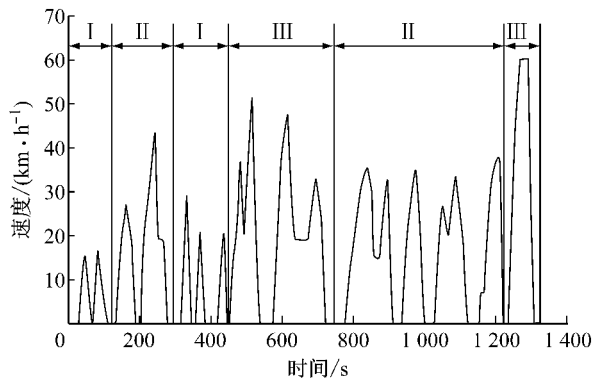


图 2 中国典型城市公交车循环
Fig.2 China City Bus Cycle

CCBC 循环是在北京、上海和广州 3 个城市公交运行工况数据基础上开发的测试循环由怠速、低速、匀速、中速和高速等 14 个工况构成,运行时间为 1 314 s,平均车速为 16.16 km·h⁻¹,行驶里程 5.89 km。杜爱民^[19]等根据上海市公交车实际道路行驶数据,构建了上海市公交驾驶循环,平均速度 15.68 km·h⁻¹,最高车速 69.41 km·h⁻¹,最大加速度和减速度为 0.5 m·s⁻²和 -0.58 m·s⁻²,怠速、加速、减速及匀速所占比例分别在 20%~30%,行驶里程 5.67 km。循环的工况特征与 CCBC 循环基本一致,因此,CCBC 循环可较好反映上海市综合交通路况。

为更好地对循环中的公交车行驶工况进行分析,将 CCBC 循环划分为低速、中速和高速行驶三类工况,其中:I 类行驶工况表示公交车在城市道路上低速行驶路况,工况时长 222 s,行驶距离 0.36 km,平均车速 5.85 km·h⁻¹,最高车速 21.10 km·h⁻¹; II 类代表公交车在城市道路上中速行驶路况,工况时长 708 s,行驶距离 3.05 km,平均车速 15.48 km

·h⁻¹,最高车速 51.70 km·h⁻¹,III 类代表公交车在城市道路上高速行驶路况,工况时长 384 s,行驶距离 2.49 km,平均车速为 23.35 km·h⁻¹,最高车速为 60 km·h⁻¹。

2 试验结果及分析

2.1 发动机工况

图 3 所示为国 IV 公交车用柴油机 CCBC 循环的工况分布。可见,CCBC 循环的发动机工况主要集中在 900~1 100 r·min⁻¹,200~500 N·m 范围内(怠速工况转矩为 0,为显示方便划分 I,II,III 类时将其排除),呈明显的低速、中低负荷特征,与 ETC 工况的高转速大扭矩特征存在明显的差异。代表城

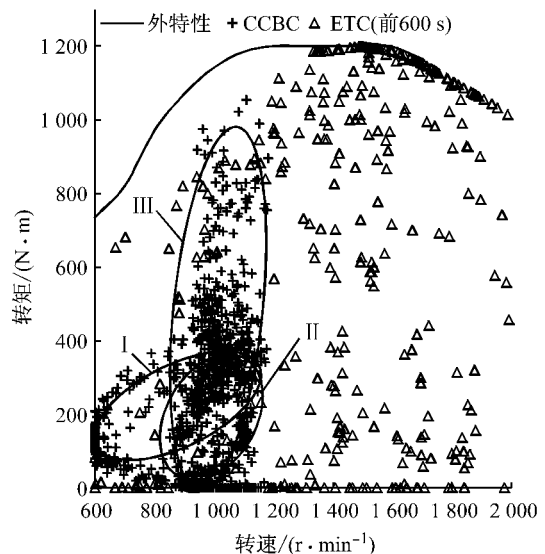


图 3 CCBC 循环发动机工况特征
Fig.3 Engine condition characteristic of CCBC

市低速路况的 I 类工况点占总循环的 16.90%，分布在 $600\sim 1\ 100\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, $80\sim 400\text{ N}\cdot\text{m}$ 范围内,为低速、低转矩工况;代表城市中速路况的 II 类工况点占总循环 53.88%，分布在 $850\sim 1\ 150\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, $40\sim 550\text{ N}\cdot\text{m}$ 范围内,亦为低速、低转矩工况,但发动机的起始转速、最高转矩等升高;代表城市高速路况的 III 类工况点占总循环 29.22%，分布在 $950\sim 1\ 200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $150\sim 1\ 000\text{ N}\cdot\text{m}$ 范围内,其转矩较 I 类、II 类工况的转矩明显增大。

2.2 污染物排放因子

车辆的单位里程污染物排放因子($\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$)表征车辆某个行驶片段(从怠速到下一个怠速的行驶过程)以里程计算的平均污染物排放。表 3 所示为 CCBC 循环下公交车燃用柴油和 B5 的污染物排放因子。

表 3 柴油和 B5 生物柴油 CCBC 循环污染物排放因子

油品	THC/ $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$	CO/ $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$	NO _x / $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$	PM/ $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$	PN/ km^{-1}
柴油	0.114	4.175	13.207	0.126	1.497×10^{13}
B5	0.134	4.059	14.262	0.119	1.499×10^{13}

由表 3 可见,与燃用柴油比较,该公交车燃用 B5 的 CO 排放降低 2.78%,PM 降低 5.5%,THC 和 NO_x 排放分别升高 18.0%和 7.9%,PN 略有增加。这是因为一方面,B5 生物柴油含氧,在燃烧过程中增加了氧的供给,促进燃烧,CO,PM 降低,NO_x 排放增加^[20]。另一方面,本次试验用生物柴油为餐厨废弃油脂制取,B5 生物柴油的密度和运动粘度相对较高,燃料的雾化相对较差,同时抗氧化剂的加入也是导致其 HC 排放增加的可能原因^[21]。

为进一步分析 CCBC 循环低速、中速、高速行驶时公交车燃用柴油和 B5 生物柴油的污染物排放差异,图 4 为国 IV 公交车燃用柴油与 B5 生物柴油 CCBC 循环低速(I 类)、中速(II 类)和高速(III 类)行驶时产生的 THC,CO,NO_x 和颗粒物质量(PM)和颗粒物数量(PN)排放因子。

由图 4a 可知,与中高速行驶比较,该公交车燃用柴油和 B5 时,低速行驶时单位里程排放的 THC 较高。与柴油比较,该公交车燃用 B5 生物柴油之后,低速行驶工况的 THC 排放因子升高 30.73%,而中速、高速行驶工况的 THC 排放因子分别升高 21.65%和 8.92%。这是因为,CCBC 循环中,公交车

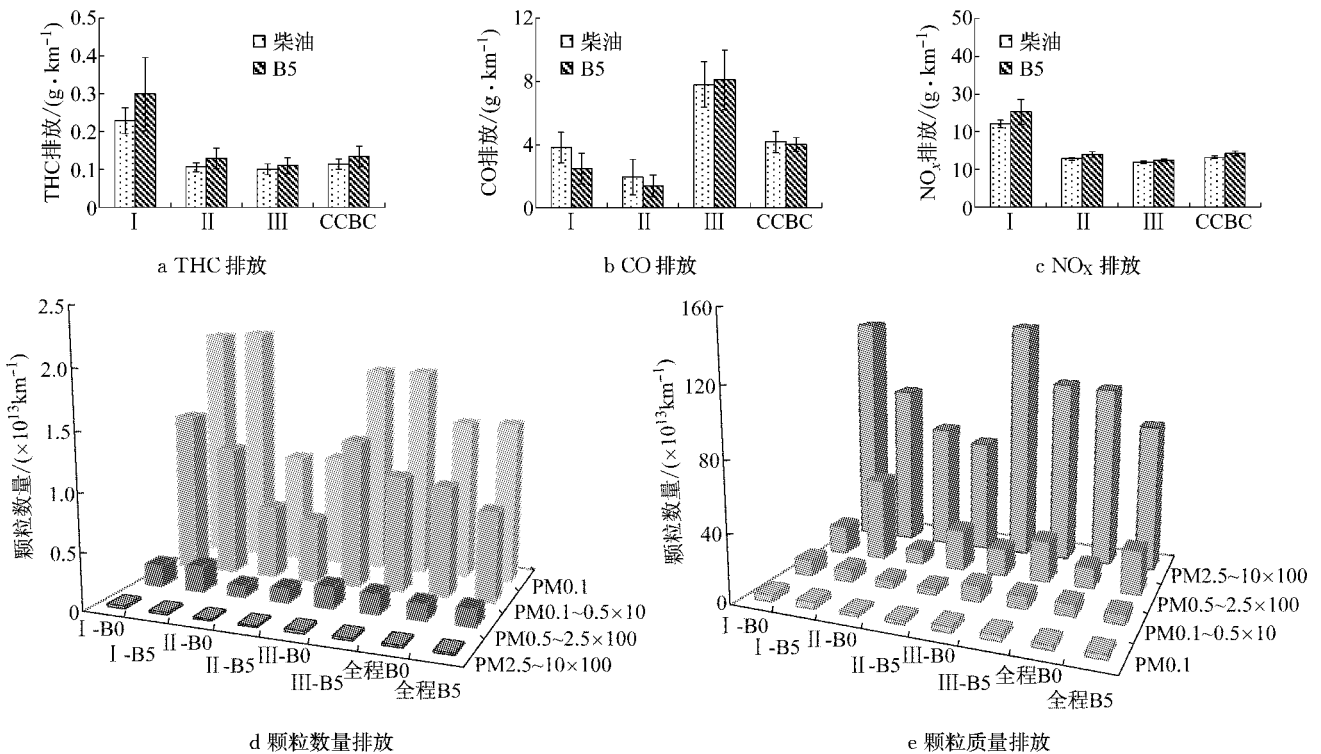


图 4 柴油、B5 生物柴油 CCBC 循环分工况污染物排放因子

Fig.4 Emission factor of diesel and B5 under CCBC

低速行驶时,发动机的怠速比例约占 60%,发动机的负荷相对较低,B5 生物柴油密度和动力粘度较大,雾化不良导致其 THC 排放增加。中速、高速行驶时,

发动机的怠速比例较低(分别为 25%和 23%),负荷相对较高,燃料的雾化相对较差,对 THC 的影响变弱,生物柴油含氧对 THC 降低作用增强,THC 排

放升高幅度变小。

由图 4b 可知,公交车燃用柴油和 B5 时,高速行驶时单位里程排放的 CO 较高.与柴油比较,该公交车燃用 B5 生物柴油之后,由于 B5 生物柴油含氧,CO 排放因子降低.由图 4c 可知,公交车燃用柴油和 B5 时,低速行驶时单位里程排放的 NO_x 较高.与柴油比较,由于 B5 生物柴油含氧,该公交车燃用 B5 生物柴油的 NO_x 排放因子增大.

研究表明,柴油机排气中存在的微粒粒径分布范围几乎全都在 10 μm 以下^[22].将柴油车排放的颗粒物进一步分为 PM_{0.1},PM_{0.1-0.5},PM_{0.5-2.5} 和 PM_{2.5-10} 四类.由图 4d 可知,公交车燃用柴油和 B5 的颗粒物数量排放主要为粒径小于 0.1 μm 的超细颗粒,其比例占有所有颗粒数量排放的 90% 以上,与柴油比较,该公交车燃用 B5 生物柴油的 PM_{0.1} 数量排放增加,PM_{0.1-0.5},PM_{0.5-2.5},PM_{2.5-10} 数量排放降低.由图 4e 可知,公交车燃用柴油和 B5 的颗粒物质量排放主要为粒径 2.5~10 μm 的大颗粒,其比例占有所有颗粒质量排放的 77% 以上.与柴油比较,该公交车燃用 B5 生物柴油的 PM_{2.5-10} 质量排放相对较低,PM_{0.5-2.5},PM_{0.1-0.5},PM_{0.1} 质量排放略有增加.综合图 4d 和 4e 可见,由于公交车的最高车速不超过 60 km·h⁻¹,公交车燃用柴油和 B5 低速行驶的单位里程排放的颗粒数量和质量相对较高,中速行驶排放的颗粒数量、质量排放因子较低.这是因为,与气态排放物类似,当车辆低速、中速、高速行驶时,燃料的雾化效果与含氧因素交互作用,当雾化不良占主导因素时,车辆的超细颗粒 PM_{0.1} 数量升高及大颗粒 PM_{2.5-10} 质量降低效果不明显;当燃料含氧,促进燃烧占主导因素时,车辆的超细颗粒 PM_{0.1} 数量增加,大颗粒 PM_{2.5-10} 质量排放降低.

2.3 污染物排放率

车辆的单位里程排放因子表征车辆某个行驶片段以里程计算的平均污染物排放.为进一步分析公交车燃用柴油和 B5 生物柴油在车辆怠速、匀速、加速、减速等行驶工况的污染物排放特性,根据公交车的行驶状态将 CCBC 循环划分为怠速、加速、匀速、减速等行驶工况区间,详细分析公交车燃用 B5 生物柴油不同行驶工况的污染排放特性.划分的行驶区间如表 4 所示,*a* 表示加速度,*v* 表示速度.

图 5 为公交车燃用柴油和 B5 生物柴油时怠速,20 km·h⁻¹ 以下低速加速、减速、匀速行驶,20 km·h⁻¹~40 km·h⁻¹ 中速加速、减速、匀速行驶,40 km·h⁻¹ 以上高速加速、减速、匀速行驶时,不同行

驶工况产生的污染物排放对 CCBC 循环整体排放的贡献率.

表 4 CCBC 循环工况区间划分

Tab.4 Division of CCBC working condition

项目	速度/加速度区间
怠速	$0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \leq v \leq 0.5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$
加速	低速 $a \geq 0, 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}, 0.5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} < v \leq 20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$
	中速 $a \geq 0, 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}, 20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} < v \leq 40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$
	高速 $a \geq 0, 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}, 40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} < v \leq 60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$
减速	低速 $a \leq -0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}, 0.5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} < v \leq 20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$
	中速 $a \leq -0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}, 20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} < v \leq 40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$
	高速 $a \leq -0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}, 40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} < v \leq 60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$
匀速	低速 $-0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} < a < 0, 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}, 0.5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} < v \leq 20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$
	中速 $-0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} < a < 0, 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}, 20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} < v \leq 40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$
	高速 $-0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} < a < 0, 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}, 40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} < v \leq 60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

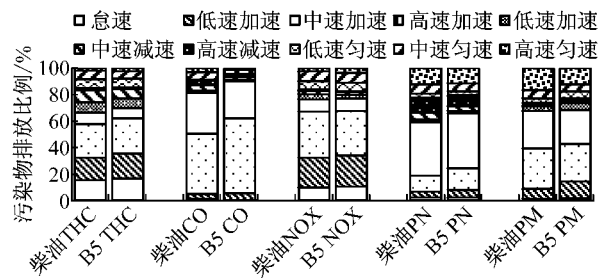


图 5 公交车燃用柴油和 B5 不同工况行驶的污染物排放特性
Fig.5 Emission characteristic of diesel and B5 in different conditions

由图 5 可见,该公交车燃用柴油和 B5 生物柴油怠速、低速加速、中速加速行驶时排放的 THC 较多,占 CCBC 循环 THC 总排放量约 60%;中速加速、高速加速行驶时排放的 CO 较多,占 CCBC 循环 CO 总排放量约 80%;低、中、高速加速行驶时排放的 NO_x 较多,占 CCBC 循环 NO_x 排放量约 66%;高速加速、匀速、减速行驶时排放的 PN 较多,占 CCBC 循环 PN 排放量约 50%;中速加速、高速加速、高速匀速行驶时排放的 PM 较多,占 CCBC 循环 PM 排放量约 66%.与柴油比较,该公交车燃用 B5 生物柴油后怠速、低速、中速加速、高速匀速行驶时 THC 排放率相对较高,低、中速加速行驶时 CO 排放率相对较高,怠速、低速加速、中速匀速、高速匀速行驶的 NO_x 排放率相对较高,低速加速、中速加速、高速加速行驶产生的 PN 排放率较高,低速加速、减速、匀速行驶产生的 PM 排放率较高.其他工况的 THC,CO,NO_x,PN 和 PM 排放率与柴油基本相当或相对降低.

3 结论

(1) CCBC 循环发动机工况集中在 $900\sim 1\ 100\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, $200\sim 500\text{ N}\cdot\text{m}$ 范围内, 呈明显的低速、中低负荷特征, 与 ETC 发动机工况存在明显的差异。

(2) 该车燃用柴油和 B5 生物柴油低速行驶工况的 THC 单位里程排放因子较高, 怠速、低速加速、中速加速行驶时排放的 THC 较多。与柴油比较, 该公交车燃用 B5 的 THC 排放升高 18.0%, 生物柴油 B5 低速行驶工况中怠速、中低速加速行驶的 THC 排放率较高是导致该车燃用 B5 生物柴油 THC 增加的主要原因。

(3) 该车燃用柴油和 B5 生物柴油高速行驶工况的 CO 单位里程排放因子较高, 中速加速、高速加速行驶时排放的 CO 较多。与柴油比较, 该公交车燃用 B5 的 CO 排放降低 2.78%, 除低、中速加速行驶时的 CO 排放率相对较高外, 其他工况的 CO 排放降低。

(4) 该车燃用柴油和 B5 生物柴油低速行驶工况的 NO_x 单位里程排放因子较高, 怠速、加速、匀速、减速四个行驶工况中低、中、高速加速行驶时排放的 NO_x 较多。与柴油比较, 该公交车燃用 B5 的 NO_x 排放升高 7.9%, 怠速、低速加速、中速匀速、高速匀速行驶的 NO_x 排放率相对较高是导致该车燃用 B5 生物柴油 NO_x 增加的主要原因。

(5) 该车燃用柴油和 B5 生物柴油颗粒物数量排放主要为 $\text{PM}_{0.1}$, 颗粒物质量排放主要为 $\text{PM}_{2.5-10}$ 。低速行驶工况的 PM, PN 单位里程排放因子均较高, 中高速加速、匀速、减速行驶时排放的 PN 较多, 中速加速、高速加速、高速匀速行驶时排放的 PM 较多。与柴油比较, 该公交车燃用 B5 的 PN 排放与柴油基本相当, PM 排放降低 5.5%, 低速加速、中速加速、高速加速行驶产生的 PN 排放率较高, 除低速加速、减速、匀速行驶工况外, 其他工况产生的 PM 排放率较低。

参考文献:

- [1] 彭美春, 林权臻, 梁晓峰, 等. 广州市公交车行驶工况与 ETC 城市工况的比较[J]. 汽车工程, 2012, 34(11): 1044.
PENG Meichun, LIN Quanzhen, LIANG Xiaofeng, *et al.* Comparison between the driving mode of city buses in guangzhou city and the urban part of ETC circle [J]. Automotive Engineering, 2012, 34(11): 1044.
- [2] 胡志远, 秦艳, 谭丕强, 等. 国 IV 柴油公交车上海市道路 NO_x 和超细颗粒排放[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2015, 43(2): 286.
HU Zhiyuan, QIN Yan, TAN Piqiang, *et al.* On-road NO_x and ultrafine particle emission characteristics of China IV diesel bus in Shanghai[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2015, 43(2): 286.
- [3] 梅德清, 孙平, 袁银南, 等. 柴油机燃用生物柴油的排放特性研究[J]. 内燃机学报, 2006, 24(4): 331.
MEI Deqing, SUN Ping, YUAN Yimian, *et al.* Investigation on exhaust emission characteristics of compression ignition engine fueled with bio-diesel [J]. Transactions of CSICE, 2006, 24(4): 331.
- [4] 谭丕强, 胡志远, 楼狄明, 等. 非直喷式增压柴油机燃用生物柴油的性能与排放特性[J]. 内燃机学报, 2006, 24(2): 110.
TAN Piqiang, HU Zhiyuan, LOU Diming, *et al.* Performance and emissions of IDI turbocharged diesel engines fueled with biodiesel fuels[J]. Transactions of CSICE, 2006, 24(2): 110.
- [5] 耿利敏, 董元虎, 边耀璋, 等. 生物柴油与轻柴油混合燃料的理化特性[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(3): 88.
GENG Limin, DONG Yuanhu, BIAN Yaozhang, *et al.* Physical and chemical properties of biodiesel and light diesel mixed fuel [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(3): 88.
- [6] 谭丕强, 阮帅帅, 胡志远, 等. 发动机燃用生物柴油的颗粒可溶有机组分及多环芳烃排放[J]. 机械工程学报, 2012, 48(8): 115.
TAN Piqiang, RUAN Shuaishuai, HU Zhiyuan, *et al.* Soluble organic fraction and polycyclic aromatic hydrocarbons in particulate matter emissions from diesel engine with biodiesel fuel[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(8): 115.
- [7] Sara Pinzi, Paul Rounce, Jose M Herreros, *et al.* The effect of biodiesel fatty acid composition on combustion and diesel engine exhaust emissions[J]. Fuel, 2013, 104: 170.
- [8] 李孟良, 苏茂辉, 秦孔建, 等. 实际行驶工况下柴油车发动机负荷分布及排放[J]. 江苏大学学报, 2007, 28(3): 213.
LI Mengliang, SU Maohui, QIN Kongjian, *et al.* Diesel engine load distribution and exhaust emissions under real-world driving condition[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2007, 28(3): 213.
- [9] 李孟良, 苏茂辉, 马金荣, 等. 北京地区实际行驶工况下柴油机负荷分布研究[J]. 车用发动机, 2007(1): 27.
LI Mengliang, SU Maohui, MA Jinrong, *et al.* Research on diesel engine load distribution under the Beijing district real-road driving cycle[J]. Vehicle Engine, 2007(1): 27.
- [10] Shauna Hallmark, Qiu Yu. Comparison of on-road emissions for B-0, B-10, and B-20 in transit buses[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2012, 62(4): 443.
- [11] 胡志远, 秦艳, 谭丕强, 等. 国 IV 柴油公交车上海市道路 NO_x 和超细颗粒排放[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2015, 43(2): 286.
HU Zhiyuan, QIN Yan, TAN Piqiang, *et al.* On-road NO_x and ultrafine particle emission characteristics of China IV diesel bus in Shanghai[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2015, 43(2): 286.
- [12] 谭丕强, 李洁, 胡志远, 等. 柴油公交车燃用不同替代燃料的排放特性[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(4): 63.

- TAN Piqiang, LI Jie, HU Zhiyuan, *et al.* Emission characteristics of diesel bus burning different alternative fuels [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2013, 13(4): 63.
- [13] 楼狄明,陈峰,胡志远,等.公交车燃用生物柴油的颗粒物排放特性[J].*环境科学*, 2013,34(10): 3749.
- LOU Diming, CHEN Feng, HU Zhiyuan, *et al.* Particle emission characteristics of diesel bus fueled with bio-diesel[J]. *Environment Science*, 2013, 34(10): 3749.
- [14] Jonathan Burton, Kevin Walkowicz, Petr Sindler, *et al.* In-Use and vehicle dynamometer evaluation and comparison of class 7 hybrid electric and conventional diesel delivery trucks [C]//SAE. Rosemont; SAE, 2013: 2013-01-2468.
- [15] Muralidharan M, Subramanian M, Kanal P C, *et al.* Investigation on the effect of 5% biodiesel-diesel blend on heavy duty buses; with different aspiration technologies in Respect of vehicle performance [C] // SAE. Detroit; SAE, 2012; 2012-01-1309.
- [16] Clark Nigel, McKain David L, Sindler Petr, *et al.* Comparative emissions from diesel and biodiesel fueled buses from 2002 to 2008 model years [C] // SAE. Rosemont; SAE, 2010; 2010-01-1967.
- [17] 王燕军,吉喆,尹航.重型柴油车污染物排放因子测量的影响因素[J].*环境科学研究*, 2014,27(3): 232.
- WANG Yanjun, JI Zhe, YIN Hang, *et al.* Study of parameters influencing measurement on heavy duty diesel vehicle's emission factors [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014,27(3): 232.
- [18] 李腾腾,秦孔建,钟绍华.不同测试循环混合动力客车排放特性对比[J].*武汉理工大学学报:信息与管理工程版*, 2011,33(1): 62.
- LI Tengting, QIN Kongjian, ZHONG Shaohua. Comparison of emission characteristics of hybrid electric bus under different driving cycles [J]. *Journal of WUT: Information & Management Engineering*, 2011,33(1): 62.
- [19] 杜爱民,步曦,陈礼璠,等.上海市公交车行驶工况的调查研究[J].*同济大学学报:自然科学版*, 2006,34(7): 943.
- DU Aimin, BU Xi, CHEN Lifan, *et al.* Investigation on bus driving cycles in Shanghai [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2006,34(7): 943.
- [20] 楼狄明,石健,赵杰,等.共轨柴油机燃用不同配比生物柴油的性能与排放特性[J].*内燃机工程*, 2009,30(6): 21.
- LOU Diming, SHI Jian, ZHAO Jie, *et al.* Performance and emission characteristics of a common rail diesel engine fueled with different proportion biodiesel blends [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2009,30(6): 21.
- [21] 王忠,吴婧,毛功平,等.抗氧化剂对生物柴油排放的影响[J].*农业工程学报*, 2014,30(24):266.
- WANG Zhong, WU Jing, MAO Gongping, *et al.* Effect of antioxidants on emission of biodiesel [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(24): 266.
- [22] 谭丕强,胡志远,楼狄明,等.柴油捕集器结构参数对不同粒径微粒过滤特性的影响[J].*机械工程学报*, 2008,44(2): 175.
- TAN Piqiang, HU Zhiyuan, LOU Diming, *et al.* Effects of diesel particulate filter structural parameters on filtration performance of different size particles [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(2): 175.

(上接第 604 页)

定最佳阀门控制策略,只能根据工程师经验来确定。

在确定阀门最佳安装位置时,利用的虚拟阀门是改变管道的局部水头损失为一个具体的值,极大地提升了寻找阀门最佳安装位置的速度.同时采用了布谷鸟算法来求解控制阀门的优化问题.是因为阀门位置和开度的优化问题属于混合离散非线性最优化模型,布谷鸟算法具有概念简单、结构明晰、初始设置值较少、与优化问题本身契合程度高等特点,并且相比于传统的遗传算法,布谷鸟算法极大地提升了寻找最优解的计算速度,使得对真实管网通过最优化算法来确定最佳阀门控制策略成为可能。

参考文献:

- [1] Lambert A. International report: water losses management and techniques [J]. *Water Science Technology Water Supply*, 2002, 2(4): 1.
- [2] Germanopoulos G. A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models [J]. *Civil Engineering Systems*, 1985, 2(3): 17.
- [3] Jowitt P, Xu C. Optimal valve control in water distribution networks [J]. *Water Resource Planning Management*, 1990, 116: 455.
- [4] Nicolini M. Optimal location and control of pressure reducing valves in water networks [J]. *Water Resource Planning Management*, 2009, 135: 178.
- [5] Ali, Mohammed E. Knowledge-based optimization model for control valve locations in water distribution networks [J]. *Water Resource Planning Management*, 2015, 141:1.
- [6] Yang Xin-She, Suash D. Cuckoo Search via levy flights [C]// World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing. Coimbatore: IEEE, 2009: 210-214.
- [7] Araujo L, Ramos H, Coelho S. Pressure control for leakage minimization in water distribution systems management [J]. *Water Resource Management*, 2006, 20(1): 133.
- [8] Germanopoulos G, Jowitt P. Leakage reduction by excess pressure minimization in a water supply network [J]. *Civil Engineering Systems*, 1989, 87(2): 195.