

基于大样本的上海市乘用车行驶工况构建

胡志远, 秦 艳, 谭丕强, 楼狄明

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

摘要: 进行了10辆车12个月连续道路行驶数据采集, 获得7 137 017条有效行驶数据, 从中提取13 789个实际道路行驶运动学片段, 通过主成分分析和聚类分析将运动学片段特征值进行降维和分类处理, 利用相关系数提取代表性行驶工况, 构建了基于大样本、符合上海市交通特征、长度为1 163 s的上海市乘用车行驶工况。结果表明: 上海市乘用车行驶工况具有平均速度低、怠速比例高、匀速比例低等特点, 与新欧洲测试循环(NEDC)存在较大差异, 采用NEDC工况开展的污染物测试不能完全反映上海市的实际交通状况, 应建立反映上海市交通特点的乘用车行驶工况。

关键词: 大样本; 行驶工况; 乘用车

中图分类号: U491.2⁺55

文献标志码: A

Large-sample-based Car-driving Cycle in Shanghai City

HU Zhiyuan, QIN Yan, TAN Piqiang, LOU Diming

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

Abstract: An on-road driving data collection test lasted for 12 months was conducted on 10 taxis in Shanghai. Over 7 137 017 valid driving data were collected and then 13 789 kinematics sequences were extracted from test data, and dimension reduction and sorting treatment of kinematics sequences' characteristic parameters were performed by principal component analysis and cluster analysis. Then according to the correlation coefficients theory, typical driving cycle fragments were selected and finally a car driving cycle of 1 163 s about the real traffic condition of Shanghai was established based on large sample statistics. The results show that the car driving cycle of Shanghai is characterized by the low average speed, high idling proportion and low cruise proportion, which shows large differences from that of new european driving cycle (NEDC). So the emission test results based on NEDC cannot exactly reflect the real traffic condition in Shanghai, and a car driving cycle based on the traffic characteristics of Shanghai should be developed.

Key words: large samples; driving cycle; car

车辆行驶工况又称汽车运转循环, 是对车辆的实际行驶状况进行调查, 并对试验数据进行分析, 运用多元统计理论建立的典型工况, 用于代表某一类车辆在特定交通环境下的行驶速度——时间历程。车辆行驶工况主要分为用于检测和评价车辆污染物排放和用于检测和评价车辆燃料消耗两种, 对新技术研发与认证、污染物排放特性及燃料经济性分析、交通控制风险评估等研究具有重要价值^[1-2]。

世界现行的车辆排放和燃料消耗量测试工况主要有美国、欧洲和日本三大体系^[3]。此外, 国外学者对构建本土化的行驶工况进行了大量研究, Fotouhi等^[4]采用K均值聚类法建立了德黑兰城市行驶工况, 并与美国FTP-75、新欧洲测试得2分(NEDC)和日本Japan10-15工况进行了比较; Matjaz Knez等^[5]建立了采列(欧洲小城市)城市行驶工况, 将其与伊斯坦布尔(大城市)、爱丁堡(中等城市)的行驶工况进行了比较; Tong等^[6]建立了越南首都河内的第一个摩托车行驶工况和轻型车城市行驶工况。

我国采用等同欧盟法规的行驶工况对轻型车进行型式认证和生产一致性检查, 由于我国城市道路建设、交通状况、汽车生产保养水平等与欧洲存在差异, 我国城市机动车实际行驶工况因而与欧洲存在差异^[7]。中国环境科学研究院王军方等^[8]采集了北京市典型乘用车、公交车和重型卡车实际道路工况数据, 构建了北京市乘用车、公交车和重型卡车行驶工况; 哈尔滨理工大学胡宸等^[9]实测了哈尔滨城市典型公交线路运行工况数据, 建立了哈尔滨城市典型公交行驶工况; 四川大学陈琳等^[10]分别采用短行程随机组合、短行程状态转移、驾驶模式片段转移和速度状态转移法建立和比较了成都市特征驾驶工况; 山东大学黄万友等^[11]建立了基于车辆能耗状态的济南市行驶工况; 合肥工业大学石琴等^[12]基于典

型道路行驶工况数据,利用 SOFM 神经网络算法和 K 均值聚类法,构建了合肥市行驶工况。

上海市是中国的特大型城市之一,其城市道路建设、交通状况等与欧洲及国内其他城市存在差异。因此,建立符合上海市交通特征的行驶工况,可以为上海市机动车污染物排放提供评价和检测依据。比较国内外学者构建的行驶工况,由于采用的工况解析方法、样本数据量不同,所构建的行驶工况差异较大。当采用相同的解析方法时,样本数量是影响所构建行驶工况精确度的关键因素,构建基于大样本的上海市行驶工况,提高行驶工况的代表性,是目前的研究热点。

本文以上海市 10 辆正常运营的出租车为研究对象,通过 12 个月的自主行驶试验,获得大量的车辆实际道路有效行驶数据,通过主成分分析和聚类分析提取代表性行驶工况片段,构建基于大样本的上海市乘用车行驶工况。

1 道路试验规划及数据采集

行驶工况的构建一般包含试验规划、数据采集、数据分析、工况解析和工况验证 5 个步骤^[13]。常用的数据采集方法主要有:平均车流统计法、车辆追踪法、自主行驶法^[14]。其中,自主行驶法不需要规划特定的试验路线,由驾驶员按正常驾驶试验车辆,可获取大量的试验数据。本文采用自主行驶法采集上海市乘用车实际道路行驶数据。

上海市出租车具有日行驶里程长、行驶路线随机性强、行驶范围广等特点,适合作为自主行驶法试验车辆进行工况数据采集。本文选取 10 辆上海市正常运营的出租车为试验车辆,进行 12 个月的自主道路行驶试验,获得大量的车辆实际道路自主行驶工况数据。

通过试验车辆 CAN 总线获得车辆识别号、行驶速度、行驶里程等车辆实时行驶工况数据,使用 GPS 设备获得车辆实时行驶的经、纬度等位置数据,这些数据通过车载终端传输到 GPRS/Internet 网络,再通过中心服务器对数据进行收集、存储。最终采集了 7 137 017 条有效数据,从中提取 13 789 个有效短行程,参照国内外同类研究^[15-16],符合大样本的特点。

2 数据分析与处理

选取适当的工况解析方法是构建车辆行驶工况的关键环节。结合上海市交通特征、机动车行驶特点,本文采用短行程分析法作为工况解析方法,解析流程如图 1 所示。

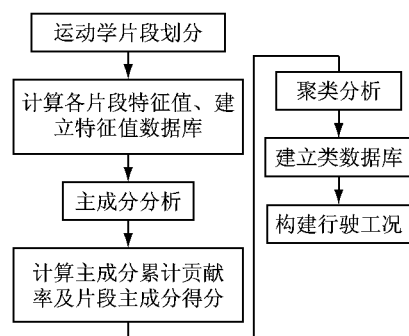


图 1 行驶工况解析流程图

Fig.1 Flow chart of driving cycle analysis

2.1 运动学片段的划分

车辆实际行驶时相邻两个停车点之间的行驶过程称为一个短行程(运动学片段),通常由一个怠速部分和一个行驶部分构成,车辆行驶的总行程可视为各运动学片段(短行程)的组合。将具有相同交通特征的短行程归为一类,车辆的总行驶数据就被划分为具有不同交通特征的几个短行程类。图 2 是这种短行程的示意图。

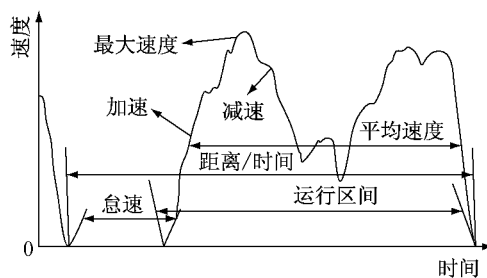


图 2 短行程的结构示意图

Fig.2 Structure diagram of the micro-trip

表 1 所列的 15 个特征值用于描述片段特征,以它们进行分类,并进行主成分分析和聚类分析。表 2 所列的 13 个特征值用于描述片段的统计分布,以挑选满足条件的片段,并进行有效性判定。

对试验车辆数据进行运动学片段划分和特征值的计算,最终得到 13 789 个片段,每个片段都有用于分类的 15 个片段特征值和用于统计分布的 13 个片段特征值,最后形成 $13\ 789 \times 28$ 的片段特征值数据库,如表 3 所示。

2.2 主成分分析和聚类分析

在车辆实际行驶工况构建过程中,需要根据交通特征(即短行程特征值)将短行程进行分类。为避免仅采用某几个片段特征值作为分类指标导致的信息丢失,及采用所有片段特征值作为分类指标导致的信息重叠,需进行主成分分析,通过构造原变量的一系列线性组合,使各线性组合在彼此不相关的前提下,尽可能多地反映原变量的信息。表 4 为对表 3 所列的运动学片段数据库进行主成分分析后的前 15

表 1 用于分类的 15 个片段特征值

Tab.1 Characteristic parameters used for classification

特征值	定义
T	运行时间/s
T_a	加速时间/s
T_d	减速时间/s
T_c	匀速时间/s
T_i	怠速时间/s
S	运行距离/m
v_{\max}	最大速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)
v_m	平均速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)
v_{mr}	运行速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)
v_{sd}	速度标准差/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)
a_{\max}	最大加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
a_a	加速段平均加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
a_{\min}	最大减速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
a_d	减速段平均减速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
a_{sd}	加速度标准差/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)

表 2 用于统计分布的 13 个片段特征值

Tab.2 Characteristic parameters used for statistical distribution

特征值	定义
P_{0-10}	0~10 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度段的比例
P_{10-20}	10~20 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度段的比例
P_{20-30}	20~30 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度段的比例
P_{30-40}	30~40 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度段的比例
P_{40-50}	40~50 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度段的比例
P_{50-60}	50~60 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度段的比例
P_{60-70}	60~70 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度段的比例
P_{70-80}	70~80 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度段的比例
P_{80}	80 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上速度段的比例
P_a	加速时间比例
P_d	减速时间比例
P_c	匀速时间比例
P_i	怠速时间比例

表 3 13 789 × 28 个片段特征值数据库

Tab.3 Database of kinematics sequences' characteristic parameters for 13 789 × 28

序号	T/s	T_a/s	T_d/s	T_c/s	T_i/s	S/m	$v_{\max}/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$...	$P_i/\%$
1	365	63	66	27	209	1 582.22	60	...	57.26
2	142	54	55	22	11	985.00	53	...	7.75
3	81	14	13	16	38	171.94	27	...	46.91
4	41	17	7	3	14	133.06	26	...	34.15
5	54	12	10	7	25	186.25	35	...	46.30
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
13 789	138	53	58	27	0	403.89	24	...	0.00

个主成分的方差、贡献率以及其累计贡献率. 本文选取前 5 个主成分进行分析, 主成分的积累超过 89%, 较好地反映了原变量信息^[17].

表 4 主成分贡献率及累计贡献百分率

Tab.4 Contribution rate of principal components

主成分序号	主成分方差	贡献率/%	累计贡献率/%
1	6.825	45.499	45.499
2	2.923	19.490	64.989
3	1.513	10.089	75.078
4	1.103	7.354	82.432
5	1.014	6.762	89.193
6	0.564	3.762	92.955
7	0.345	2.300	95.256
8	0.274	1.824	97.079
9	0.147	0.983	98.062
10	0.099	0.659	98.721
11	0.073	0.487	99.208
12	0.064	0.429	99.636
13	0.037	0.247	99.883
14	0.018	0.117	100.000
15	0.000	0.000	100.000

计算 5 个主成分与 15 个片段分类特征值间的相关系数解析 5 个主成分所代表的特征参数, 表 5 列出了部分运动学片段的 5 个主成分得分.

根据道路交通规律, 车辆行驶的运动学片段一

般可以分成低速(平均运行速度低、加减速频繁)、中速(平均运行速度适中、加减速正常)、高速(平均运行速度高、加速比例大)3 个类别. 基于获得的运动学

表 5 运动学片段的主成分得分

Tab.5 Kinematics sequences' principal component scores

序号	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分	第 4 主成分	第 5 主成分
1	0.453 5	-0.238 2	-0.436 1	-0.164 5	0.615 6
2	1.271 8	-0.142 3	1.262 5	0.321 9	1.462 9
3	0.841 2	0.550 1	0.025 0	-0.720 7	1.306 9
4	0.714 4	-0.303 7	-0.002 9	0.503 2	1.054 8
5	0.794 6	-0.298 4	-0.464 1	-1.113 6	0.506 7
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1378 9	1.507 4	-11.101 3	4.140 2	-9.197 7	-9.269 9

片段的 5 个主成分得分, 对抽取的 13 789 个运动学片段进行聚类分析, 得到 3 类行驶工况的聚类中心及 3 个聚类中心之间的距离. 计算每个运动学片段与 3 个聚类中心间的距离确定其所属的类别, 即将所有运动学片段划分为低速、中速和高速 3 类. 3 个聚类片段的综合描述特征值如表 6 所示.

3 行驶工况的构建

计算 13 789 运动学片段与 3 类聚类片段的相关

表 6 3 类片段综合特征值
Tab.6 Three kinds of kinematics sequences' comprehensive characteristic parameters

特征值	第 1 类	第 2 类	第 3 类
T/s	328.53	171.35	196.21
T_a/s	115.25	47.67	27.08
T_d/s	92.65	51.63	29.71
T_c/s	107.99	22.96	12.48
T_i/s	12.68	49.09	126.93
S/m	2 814.14	766.55	554.33
$v_{max}/(km \cdot h^{-1})$	120.00	57.00	41.00
$v_m/(km \cdot h^{-1})$	41.26	20.24	12.33
$v_{mr}/(km \cdot h^{-1})$	48.69	28.12	19.13
$v_{sd}/(km \cdot h^{-1})$	12.46	9.38	6.15
$a_{max}/(m \cdot s^{-2})$	2.64	1.82	1.43
$a_a/(m \cdot s^{-2})$	0.43	0.41	0.39
$a_{min}/(m \cdot s^{-2})$	-4.2	-2.14	-1.58
$a_d/(m \cdot s^{-2})$	-0.5	-0.73	-0.68
$a_{sd}/(m \cdot s^{-2})$	0.85	0.65	0.83
$P_{0-10}/\%$	2.68	30.99	36.42
$P_{10-20}/\%$	6.90	28.17	25.19
$P_{20-30}/\%$	10.72	13.33	18.18
$P_{30-40}/\%$	19.74	10.87	12.99
$P_{40-50}/\%$	24.92	7.54%	4.43%
$P_{50-60}/\%$	14.86%	5.82	1.42
$P_{60-70}/\%$	6.45	1.92	0.71
$P_{70-80}/\%$	9.10	0.69	0.42
$P_{80}/\%$	4.63	0.67	0.24
$P_a/\%$	35.08	27.82	13.80
$P_d/\%$	28.20	30.13	15.14
$P_c/\%$	32.87	13.40	6.36
$P_i/\%$	3.86	28.65	64.69

性系数,选取相关系数最大的运动学片段分别代表低速、中速、高速三类行驶特征工况,如图 3 所示,其相关性系数分别为:0.999 985, 0.999 884 和 0.999 93。

根据国外经验,行驶工况时间长度为 900~1 200 s,工况构建中某类运动学代表片段个数的确定是由这类运动学片段在总工况中所占时间除以这一类运动学片段平均运行时间,然后按四舍五入取整^[11]。本文选取 2 个低速片段、2 个中速片段、1 个高速片段构建出上海市乘用车行驶工况如图 4 所示。

可见,上海市乘用车行驶工况的平均速度为 16.20 $km \cdot h^{-1}$,行驶速度在 10~20 $km \cdot h^{-1}$ 区间的行驶时间比例超过 30%。

将上海市乘用车行驶工况与国际上常用的三种标准测试工况(欧洲 NEDC、美国 FTP-75、日本 Japan10-15)比较,如表 7 所示。可见,与美国 FTP-75 工况比较,上海市乘用车行驶工况的减速时间比例与 FTP-75 工况接近,加速时间比例和匀速时间比例较低,怠速时间比例高 1 倍左右,平均速度较低,两种工况间的差异较大。

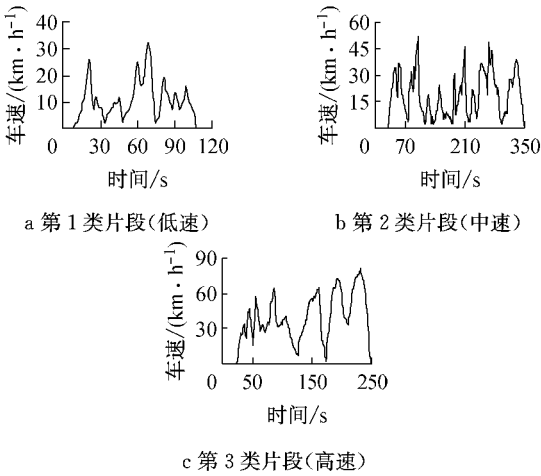


图 3 三类代表片段速度-时间图
Fig.3 Speed-time figures of three representative kinematics sequences

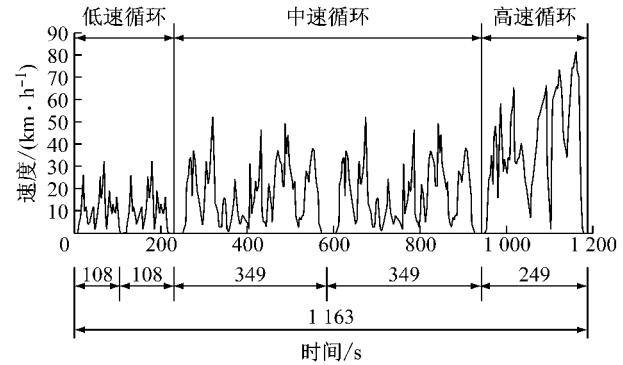


图 4 上海市乘用车道路行驶工况
Fig.4 The car driving cycle of Shanghai

表 7 上海市乘用车行驶工况与三种标准测试工况对比
Tab.7 Comparison among the car driving cycle of Shanghai and three other standard test cycles

行驶工况	平均速度/ ($km \cdot h^{-1}$)	运行速度/ ($km \cdot h^{-1}$)	加速段平均加 速度/($m \cdot s^{-2}$)	减速段平均减 速度/($m \cdot s^{-2}$)	加速比例/%	减速比例/%	匀速比例/%	怠速比例/%
上海	16.20	24.91	0.41	-0.69	24.29	26.26	11.78	37.67
NEDC	33.60	44.05	0.51	-0.71	23.81	17.63	34.75	23.81
FTP-75	34.07	41.63	0.59	-0.69	33.70	28.50	22.20	17.40
Japan10-15	17.70	23.70	0.63	-0.62	25.90	26.40	22.20	25.40

与 Japan10-15 工况比较,上海市乘用车行驶工况的加速时间比例和减速时间比例与 Japan10-15 工

况接近,匀速时间比例较低,怠速时间比例较高,平均速度与 Japan10-15 工况接近,两种工况在匀速、怠

速方面差异较大。

与欧洲 NEDC 工况比较,上海市乘用车行驶工况的加速时间比例与 NEDC 接近,减速时间比例较高,匀速时间比例低 20% 以上,怠速时间比例较高,平均速度只有 NEDC 的 50% 左右。

我国轻型车型认证和生产一致性检查采用等同欧洲法规 NEDC 循环的 I 型试验循环,上海市乘用车行驶工况在平均速度、怠速时间比例、匀速时间比例等与 NEDC 循环存在较大差异。因此,采用 NEDC 循环测量的污染物测试结果不能完全反映上海市的实际交通状况,因此,有必要构建代表上海市实际交通状况的行驶工况,为上海市机动车污染物排放提供评价和检测依据。

4 结论

(1) 采集了 7 137 017 条有效行驶数据,提取了 13 789 个运动学片段,应用主成分分析和聚类分析将运动学片段特征值进行降维和分类处理,构建了基于大样本,符合上海市交通特征,长度为 1 163 s 的上海市乘用车行驶工况。

(2) 上海市乘用车行驶工况具有平均速度低,怠速比例高,匀速比例低的特点,与美国 FTP-75、日本 Japan10-15 和欧洲 NEDC 工况存在一定的差异。

(3) 上海市乘用车行驶工况的平均速度、怠速时间比例、匀速时间比例等与欧洲 NEDC 工况存在较大差异,采用 NEDC 工况进行的污染物测试不能完全反映上海市的实际交通状况,应建立反映上海市交通特点的乘用车行驶工况。

参考文献:

- [1] 袁素粉. 城市车辆行驶工况的研究与传动系统的优化匹配[D]. 武汉:武汉理工大学,2013.
- [2] YUAN Sufen. City driving cycles research and matching optimization of power train system [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
- [3] 蔺宏良,余强,张雪莉. 市区道路车辆行驶工况研究进展[J]. 机械科学与技术,2014, 33(2): 282.
- [4] LIU Hongliang, YU Qiang, ZHANG Xueli. A review of research on vehicle's driving cycle in urban roads [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2014, 33(2): 283.
- [5] 王楠楠. 城市道路行驶工况构建及油耗研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2012.
- [6] WANG Nanman. Construction of the urban road driving cycle and research of the fuel consumption [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012.
- [7] Fotouhi A, Montazeri-Gh M. Tehran driving cycle development using the *k*-means clustering method [J]. *Scientia Iranica*, 2013, 20(2): 286.
- [8] Matjaz Knez, Tariq Muneer, Borut Jereb, *et al.* The estimation of a driving cycle for Celje and a comparison to other European cities[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2014(11): 56.
- [9] TONG H Y, TUNG H D, HUNG W T. Development of driving cycles for motorcycles and light-duty vehicles in vietnam[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(29): 5191.
- [10] 马冬,丁焰,刘志华,等. 轻型汽车实际行驶工况的排放研究[J]. 安全与环境学报, 2008, 8(5): 67.
- [11] MA Dong, DING Yan, LIU Zhihua, *et al.* On the emission behaviors of light-duty vehicles under the real driving cycle [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2008, 8(5): 67.
- [12] 王军方,丁焰,王爱娟,等. 北京市机动车行驶工况研究[J]. 环境工程技术学报,2012, 2(3): 240.
- [13] WANG Junfang, DING Yan, WANG Aijuan, *et al.* Study of vehicle driving cycle modes on road in Beijing[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2012, 2(3): 240.
- [14] 胡宸,吴晓刚,李晓军,等. 哈尔滨城市公交工况的构建[J]. 哈尔滨理工大学学报,2014, 19(1): 85.
- [15] HU Chen, WU Xiaogang, LI Xiaojun, *et al.* Construction of harbin city driving cycle[J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2014, 19(1): 85.
- [16] 陈琳,张凯山,张健,等. 城市特征驾驶工况建立及结果比较研究[J]. 环境科学与技术,2014, 37(1): 148.
- [17] CHEN Lin, ZHANG Kaishan, ZHANG Jian, *et al.* Construction and results comparison of city-specific driving cycles[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(1): 148.
- [18] 黄万友,程勇,李闯,等. 基于车辆能耗状态的济南市道路行驶工况构建[J]. 西南交通大学学报,2012, 47(6): 989.
- [19] HUANG Wanyou, CHENG Yong, LI Chuang. Driving cycle construction of city road based on vehicles energy consumption in jinan[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2012, 47(6): 989.
- [20] 石琴,仇多洋,周洁瑜. 基于组合聚类法的行驶工况构建与精度分析[J]. 汽车工程,2012, 34(2): 164.
- [21] SHI Qin, QIU Duoyang, ZHOU Jieyu. Driving cycle construction and accuracy analysis based on combined clustering technique[J]. *Automotive Engineering*, 2012, 34(2): 164.
- [22] 曾小荣,孔令文,杨学易,等. 主成分分析在车辆行驶工况中的应用[J]. 汽车实用技术,2014(5):5.
- [23] ZENG Xiaorong, KONG Lingwen, YANG Xueyi, *et al.* Application of principal component analysis in vehicle driving cycles[J]. *Automobile Applied Technology*, 2014(5): 5.
- [24] 李宁. 城市道路车辆行驶工况的构建与研究[D]. 保定:河北农业大学,2013.
- [25] LI Ning. The construction and study of vehicle driving cycle based on urban road[D]. Baoding: Agriculture University of Heibei, 2013.
- [26] Andre M, Hickman A J, Hassel D, *et al.* Driving cycles for emissions measurements under european conditions [R]. [S. l.]: SAE Technical Paper, 1995.
- [27] De Haan P, Mario K. Real-world driving cycles for emission measurements: Artemis and Swiss cycles [D]. [S. l.]: Swiss Agency for Environment, Forests and Landscape (SAEFL), 2001.
- [28] 石琴,马洪龙,丁建勋,等. 改进的 FCM 聚类法及其在行驶工况构建中的应用[J]. 中国机械工程. 2014, 25(10): 1381.
- [29] SHI Qin, MA Honglong, DING Jianxun, *et al.* An improved FCM clustering algorithm and its applications of vehicle driving cycle construction[J]. *China Mechanical Engineering*, 2014, 25(10): 1381.