

基于运动学片段的城市道路行驶工况的研究^{*}

石 琴^{1,2}, 郑与波¹, 姜 平²

(1. 合肥工业大学机械与汽车工程学院, 合肥 230009; 2. 合肥工业大学交通运输工程学院, 合肥 230009)

[摘要] 以合肥市典型道路为例, 将大量行驶工况的实验数据划分为运动学片段, 并选出 11 个特征参数进行研究。首先用主成分分析法对运动学片段进行降维处理; 接着利用 K 均值聚类技术对其进行分类。分析结果验证了在城市道路行驶工况研究中应用主成分分析法和 K 均值聚类法的可行性和有效性; 最后拟合出合肥市典型道路的代表性行驶工况。与实验数据的对比结果表明, 拟合的行驶工况能综合反映合肥市的交通状况。

关键词: 行驶工况; 运动学片段; 主成分分析; 聚类分析

A Research on Driving Cycle of City Roads Based on Microtrips

Shi Qin^{1,2}, Zheng Yubo¹ & Jiang Ping²

1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009

2. School of Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009

[Abstract] Taking the typical roads in Hefei City as example, massive test data of driving cycle are divided into a number of microtrips and 11 characteristic parameters are selected. On these bases a research on driving cycle is carried out. Firstly, dimension reduction treatment is performed on microtrips by principal component analysis, and they are then classified by using K means clustering technique. The results of analysis verify the feasibility and effectiveness of applying principal component analysis and K means clustering in studying driving cycle for city road. Finally a representative driving cycle for the typical roads in Hefei City is worked out and compared with test data. The results show that the fitted driving cycle can represent the overall traffic conditions in Hefei City.

Keywords: driving cycle; microtrips; principal component analysis; cluster analysis

前言

车辆行驶工况(也称车辆测试循环)是描述典型车辆行驶的速度时间曲线,用于确定车辆污染物排放量、燃油消耗量、新车型的技术开发和评估,甚至测定交通控制的风险等,是汽车工业一项共性的核心技术。不同国家或地区由于道路交通和车辆状况的不同,具有不同的行驶工况。很多国家以标准形式提出了不同车型在不同条件下的标准工况。国内近年来在研究行驶工况方面取得了一些研究成果:应用动态聚类法研究了车辆行驶工况的构建^[1];我国城市车辆行驶工况的构建和污染物排放系数的

测定^[2];对香港城区的车辆行驶工况进行研究^[3]。

主成分分析和聚类分析被广泛应用在行驶工况的构建上^[4-6]。主成分分析法是一种处理多维数据的统计学方法,是聚类分析的基础。聚类分析的基本思想是依照事物的数值特征来观察事物之间的亲疏关系,它包括分层聚类法、两步聚类法、 K 均值聚类法等。本文中把主成分分析和 K 均值聚类有机结合起来,应用到车辆行驶工况的构建中。研究表明,这两种方法运用在行驶工况构建上合理可行。

1 基础理论

1.1 运动学片段

^{*} 国家自然科学基金项目(70771036,71071044)资助。

原稿收到日期为 2010 年 4 月 20 日,修改稿收到日期为 2010 年 7 月 5 日。

车辆从起步出发至目的地停车,由于受道路交通状况影响,其间可能经过多次起步和停车等操作。将车辆从一个怠速开始到下一个怠速开始的运动定义为运动学片段(以下简称片段),如图1所示,车辆的行程即可视为各种片段的组合。其中某些片段反映的交通状况可能相同。不同的时间、地理位置和公路类型会出现相同的片段,有时繁忙的高速公路上的片段可能和拥挤的城市中的片段完全一致。将这些片段类型和交通状况联系起来,针对性地分析不同速度的运动形态,并在此基础上构建工况,是完全合理的。

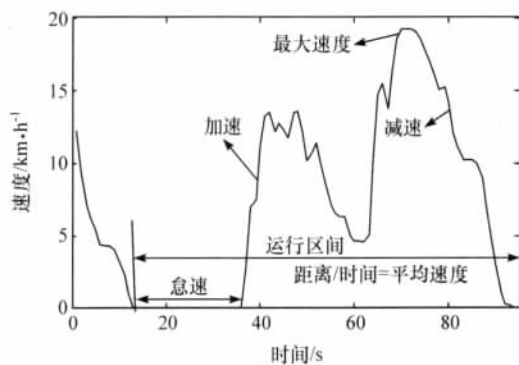


图1 运动学片段定义

1.2 主成分分析^[6]

经过多次选用不同数量的特征参数做主成分分析,最后选出11个统计学参数描述和评价运动学片段的特征:持续时间 t ,s;行驶距离 s ,m;平均速度 v_m ,km/h;平均行驶速度 v_{mr} ,km/h;最大加速度 a_{\max} , m/s^2 ;最大减速度 d_{\max} , m/s^2 ;怠速时间 t_i ,s;加速时间 t_a ,s;减速时间 t_d ,s;匀速时间 t_c ,s;平均路面功率 P ,kW。

通过实验数据可以构造包括11个特征参数和所有运动学片段的参数矩阵为

$$Z_{m \times n} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2n} \\ \cdots & \cdots & \ddots & \cdots \\ z_{m1} & z_{m2} & \cdots & z_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: z_{ij} ($i=1,2,\cdots,m,j=1,2,\cdots,n$)是第 i 个片段的第 j 个参数; $m=71$ 是所有片段数; $n=11$ 是所有特征参数。对矩阵 Z 进行标准化计算得矩阵 X 为

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中:

$$x_{ij} = (z_{ij} - \bar{z}_j) / s_j \quad (3)$$

$$\bar{z}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m z_{ij} \quad (4)$$

$$s_j^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (z_{ij} - \bar{z}_j)^2 \quad (5)$$

由矩阵 X 计算协方差矩阵 Σ ,其定义为

$$\Sigma = \begin{bmatrix} s_1^2 & \text{cov}(1,2) & \cdots & \text{cov}(1,n) \\ \text{cov}(2,1) & s_2^2 & \cdots & \text{cov}(2,n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{cov}(n,1) & \text{cov}(n,2) & \cdots & s_n^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中:

$$s_x^2 = \text{cov}(x,x) \quad (7)$$

$$\text{cov}(x,y) = \text{cov}(y,x) = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (8)$$

由矩阵 Z 得其相关矩阵 R ,其定义为

$$R = \frac{1}{m-1} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\text{其中: } r_{xy} = \frac{\text{cov}(x,y)}{s_x s_y} \quad (10)$$

用 λ_i 表示矩阵 R 的特征值, $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_n \geq 0$,计算出相应的正交化特征向量为

$$[e_1 \quad e_2 \quad e_3 \quad \cdots \quad e_n] = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \cdots & e_{1n} \\ e_{21} & e_{22} & \cdots & e_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{n1} & e_{n2} & \cdots & e_{nn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

设 $\lambda_i / \sum_{j=1}^n \lambda_j$ 为第 i 个主成分的贡献率公式,贡献率越大,主成分所表达的信息越多,前 r 个特征值的贡献率之和为: $\sum_{r=1}^l \lambda_r / \sum_{j=1}^n \lambda_j$ 。如果 $\sum_{r=1}^l \lambda_r / \sum_{j=1}^n \lambda_j \geq 80\%$,前 r 个特征值就能满足工程应用的需要,即每个运动学片段有 r 个主成分。

1.3 聚类分析

在聚类分析^[8]中,片段之间的“亲疏程度”极为重要,它直接影响最终的聚类结果。对“亲疏程度”的度量有两种表示方法:一个是代表片段之间相似程度的“相关参数”;另一个是代表片段之间差异程度的距离。

设 x_{ik} 为第 i 个片段第 k 个变量,每个片段定义

了 q 个变量,则片段 x_i 和 x_j 之间的相关系数为

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j)}{[(\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)^2)(\sum_{k=1}^n (x_{kj} - \bar{x}_j)^2)]^{1/2}} \quad (12)$$

片段 x_i 和 x_j 之间的距离 D_{ij} 定义为

$$D_{ij}(q) = (\sum_{k=1}^n |x_{ik} - x_{jk}|^q)^{1/q} \quad (13)$$

式(13)称为明可夫斯基距离(Minkowski distance),其中 n 为大于 0 的整数。

当 $q=1$ 时, $D_{ij}(1) = (\sum_{k=1}^n |x_{ik} - x_{jk}|)$, 称为绝对值距离或 Manhattan 距离,在 SPSS 中称为“block”。

当 $q=2$ 时, $D_{ij}(2) = (\sum_{k=1}^n |x_{ik} - x_{jk}|^2)^{1/2}$, 称为欧几里德距离(Euclidean distance)。

当 $q=\infty$ 时, $D_{ij}(\infty) = (\sum_{k=1}^n |x_{ik} - x_{jk}|^\infty)^{1/\infty}$, 称为契比雪夫距离(Chebychev distance)。

片段之间的相关系数 r_{ij} 也可转换为片段之间的距离 D_{ij} , 转化公式为

$$D_{ij} = \sqrt{1 - r_{ij}^2} \quad (14)$$

因此,片段之间的“亲疏程度”可统一用片段之间的距离来表示。

2 道路行驶工况的构建

2.1 实验道路的选择

合肥市的道路等级主要分为主干道、次干道和支路,基于交通流理论^[9]: $v = KQ$ (其中 v 表示车速, Q 表示车辆流量, K 表示车辆间距),统计出实验选择的其中 3 条线路高峰时段的交通流量,见表 1。

表 1 实验 3 条线路高峰时段的交通流量 辆

时间段	屯溪路	胜利路	环湖东路
7:30-8:30	2 605	1 164	589
7:40-8:40	2 628	1 180	601
7:50-8:50	2 587	1 219	615
8:00-9:00	2 517	1 035	572
8:10-9:10	2 530	1 124	562
8:20-9:20	2 474	1 085	556
8:30-9:30	2 462	1 081	559

从表 1 中可以看出,屯溪路的交通流量最大,它

代表了合肥市的主干道的交通状况;胜利路的交通流量次之,代表了次干道的交通状况;环湖东路的交通流量最小,代表了支路的交通状况。这 3 条实验道路基本上覆盖了城市道路的所有类型,再加上另外两条典型道路。最终选取合肥市屯溪路、胜利路等 5 条典型道路进行样本采集。

2.2 样本采集

为保证构建的代表性工况能够真实地反映道路实际行驶工况,须采集大量的不同行驶路线的行驶数据。本文中以合肥市典型道路为采集对象,每条测试路段连续采样 14 天,且天气没有太大变化。采集的部分实验数据的速度、加速度见图 2 和图 3。

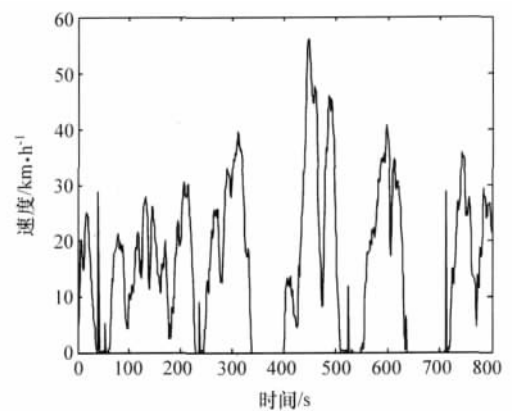


图 2 实验数据速度-时间曲线

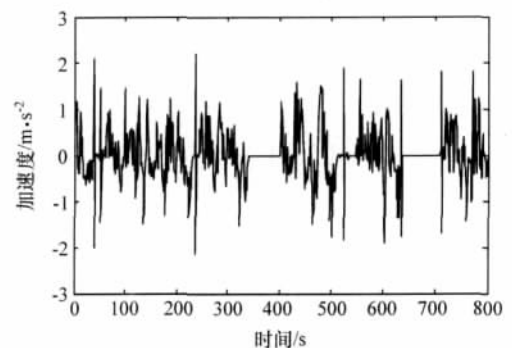


图 3 实验数据加速度-时间曲线

实验车辆为昌河爱迪尔 CH7111A 轿车,其基本参数见表 2。实验时保持一定车距,不强行超车,不脱挡滑行,以正常驾驶采集数据。

2.3 主成分分析结果

实验一共收集了 18 000 多组数据,选出其中具有代表性的部分数据,并将其分成 478 个运动学片段,如表 3 所示。

通过对合肥乘用车实验数据的分析,得到各主

成分 $M_i(i = 1 \sim 10)$ 的特征值和贡献率,见表 4。

表 2 实验车基本参数

名称	数值
整备质量/kg	930
整车尺寸(长×宽×高)/mm	3 560×1 600×1 670
轴距/mm	2 335
发动机排量/L	1.1
燃油种类	汽油
排放标准	欧 II
最大功率/kW(转速/r·min ⁻¹)	48(5 700)
最大扭矩/N·m(转速/r·min ⁻¹)	88(3 000)
挡位型式	5 挡手动

表 3 所有运动学片段及其特征参数

片段序号	t/s	s/m	$v_m/km \cdot h^{-1}$...	t_d/s	t_c/s	P/kW
1	174	2 778.3	15.96	...	37	94	0.880
2	109	2 155.6	19.78	...	20	59	1.340
3	187	2 851.7	15.25	...	40	51	1.270
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
66	149	2 618.9	17.58	...	31	70	1.110
67	34	64.07	1.881	...	1	15	0.104
68	111	1 619.3	14.59	...	18	70	0.867
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
476	123	2 874.2	23.37	...	34	45	1.297
477	59	1 597.3	27.07	...	15	19	2.115
478	60	177.86	2.964	...	6	9	0.177

表 4 各主成分贡献率及累积贡献率

	特征值	贡献率/%	累计率/%
M_1	5.695	51.776	51.776
M_2	1.518	13.797	65.57
M_3	1.307	11.88	77.45
M_4	1.096	9.96	87.42
M_5	0.617	5.61	93.03
M_6	0.35	3.18	96.2
M_7	0.26	2.39	98.58
M_8	0.114	1.03	99.6
M_9	0.028	0.254	99.88
M_{10}	0.013	0.115	100.0

从理论上讲,进行主成分分析时选取累积率超过 80% 的前几个主成分即可,由表 4 可以看出前 4 个主成分的特征值的贡献率已达到了 87.42%,基本代表了片段 11 个特征参数所有信息,因此选取前 4 个主成分进行分析。

通过 SPSS 软件分析,可得到各主成分的载荷矩阵,由此可以确定前 5 个主成分与 11 个特征参数的

相关系数,如表 5 所示。

表 5 主成分载荷矩阵

特征参数	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5
t	0.910	-0.090	0.135	0.356	-0.098
s	0.178	0.887	-0.110	0.005	-0.344
v_m	0.901	0.001	0.03	-0.19	0.337
v_{mr}	0.859	0.109	-0.106	-0.023	0.444
a_{max}	0.393	-0.148	-0.807	-0.138	-0.085
d_{max}	-0.59	0.203	0.495	0.141	0.232
t_i	-0.057	0.291	-0.347	0.867	0.173
t_a	0.946	-0.059	0.22	0.082	-0.155
t_d	0.943	-0.005	0.171	0.081	-0.173
t_c	0.856	-0.309	0.27	0.091	-0.13
P	0.514	0.681	-0.013	-0.35	0.128

从表 5 中相关系数的大小可以得出:(1)第 1 主成分主要反映持续时间、平均速度、平均行驶速度、最小加速度、加速时间和匀速时间;(2)第 2 主成分主要反映了行驶距离;(3)第 3 主成分主要反映了最小加速度;(4)第 4 主成分主要反映了怠速时间;(5)第 5 主成分基本与各参数无主要相关。

根据各主成分与特征参数的相关性,从前 4 个主成分里选出具有代表性的 6 个特征参数用于聚类分析,分别是:怠速时间 t_i 、加速时间 t_a 、减速时间 t_d 、匀速时间 t_c 、行驶距离 s 、平均速度 v_m 。

2.4 K 均值聚类结果及分析

对所有运动学片段进行分 2 类、分 3 类和分 4 类的动态聚类分析,最终聚类中心对比见图 4。由图可见,分 2 类和分 4 类情况下,各状态的时间比例差别不很明显,特别是怠速比例,而分 3 类时,各状态间的分类比较明显,所以选择分 3 类较为合理。

由图 4(b) 可以看出,第 1 类片段的怠速比例比较大,而匀速比例较小,所以第 1 类片段反映了车辆在交通拥挤的城市主干道上的行驶特性,第 2 类怠速比例很小,匀速比例一般,而加减速频繁,反映了车辆在交通较畅通的次干道上的行驶特性,第 3 类怠速比例一般,匀速比例较大,反映了车辆在交通畅通的城郊道路上行驶特性。

表 6 是 K 均值聚类分析类成员列表,从表中可以看出,478 个运动学片段被分成了 3 类以及每个片段所属类中心的距离,第 1 类包括了 122 个运动学片段,第 2 类包含了 10 个运动学片段,其他的片段为第 3 类。

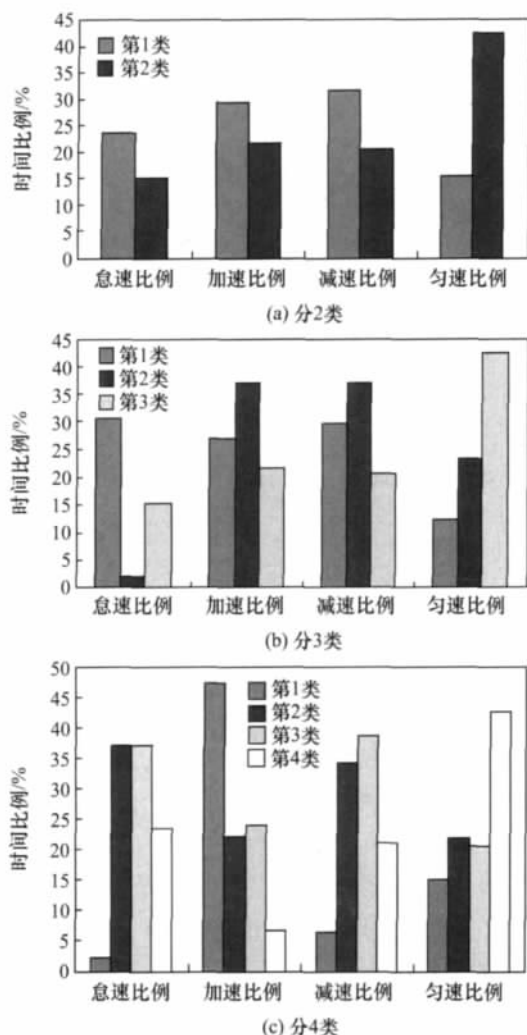


图4 不同分类的时间比例聚类中心

表6 K均值聚类分析的类成员列表

片段序号	类别	距离	片段序号	类别	距离
1	3	61.71	74	1	256.81
2	3	22.23	⋮	⋮	⋮
3	3	56.37	476	3	53.58
⋮	⋮	⋮	477	2	0
73	1	269.23	478	3	52.28

3 结果分析

以合肥市5条典型道路为例,以上述11个特征参数为准则数,根据主成分分析和K均值聚类分析,分别从上述两类片段中提取代表性的片段拟合合肥市典型道路的代表性行驶工况,图5~图8分别为代表性行驶工况的速度和加速度曲线以及速度与加速度联合分布图和代表性行驶工况与实验数据误差的

三维图。以各特征参数为基准,把拟合工况与实验数据进行比较,为便于比较,把各种模式所占时间转换成各种模式所占的时间百分比,如怠速时间百分比 p_i 、加速时间百分比 p_a 、减速时间百分比 p_d 和匀速时间百分比 p_c ,见表7。

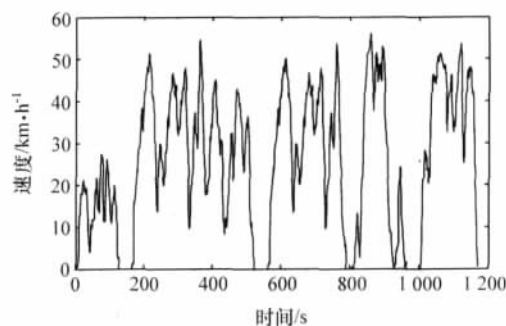


图5 代表性行驶工况速度-时间图

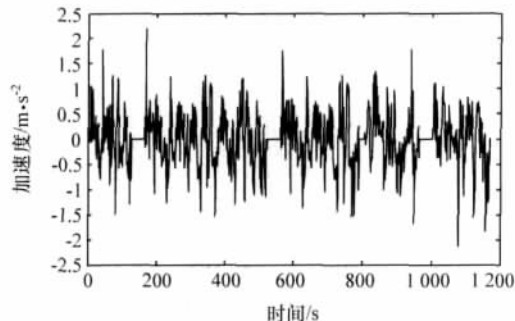


图6 代表性行驶工况加速度-时间图

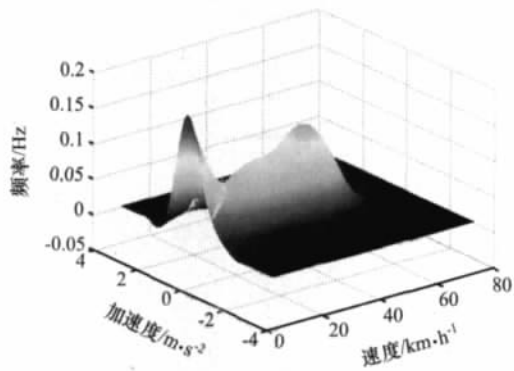


图7 代表性工况速度-加速度联合频率分布图

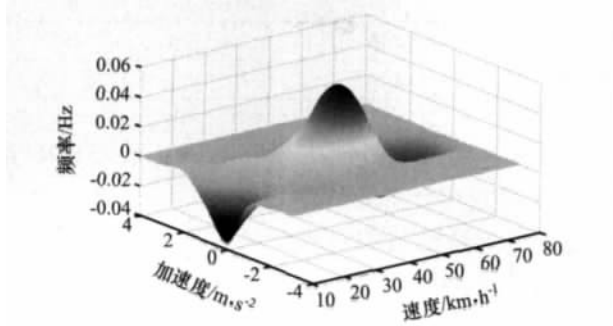


图8 代表性工况与实验数据之间的误差速度-加速度联合频率分布图

表7 典型道路实测数据与行驶工况的比较

特征参数	拟合工况	实验数据	误差/%
$v_m / \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	25.66	25.27	1.5
$v_{mr} / \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	29.33	28.75	2.0
$a_{\max} / \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	2.20	2.20	0
$d_{\max} / \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	-2.13	-2.27	6.6
$p_i / \%$	12.55	12.02	4.2
$p_a / \%$	34.18	33.75	1.3
$p_d / \%$	36.06	35.79	0.7
$p_c / \%$	17.21	18.44	7.1
P / kW	1.86	2.17	16.7

由表7可见,合肥市典型道路的拟合行驶工况与实验数据的平均相对误差仅为4.46%,说明拟合得到的代表性行驶工况能综合反映合肥地区的实际道路交通状况。

4 结论

(1) 通过在合肥5条典型道路进行测试,得到大量的实际行车速度数据,实验重复性较好,同时选择11个准则数用以评价合肥地区的交通模式。经分析,合肥的交通有如下特点:怠速时间较短,加速减速较频繁,匀速行驶比例一般,与欧洲等发达国家的交通模式有很大的不同。因此,我国各大、中型城

市构造自己的行驶工况以及排放标准很有必要。

(2) 基于主成分分析的方法进行典型道路行驶工况的提取,剔除了一些相关的重叠部分,可使研究更为简单、可行。

参考文献

[1] 马志雄,朱西产,李孟良,等. 动态聚类法在车辆实际行驶工况开发中的应用[J]. 武汉理工大学学报,2005,27(11): 69-71.

[2] 刘希玲,丁焰. 我国城市汽车行驶工况调查研究[J]. 环境科学研究,2000,13(1): 23-28.

[3] 赵慧,张镇顺,熊永达. 香港城区汽车行驶工况的研究[J]. 环境科学学报,2000,20(3): 12-16.

[4] 艾国和,乔维高,李孟良,等. 车辆行驶运动学参数构成分析[J]. 公路交通科技,2006,23(2): 154-157.

[5] Dembski N, Guezennec Y, Soliman A. Analysis and Experimental Refinement of Real-world Driving Cycles[C]. SAE Paper 2002-01-0069.

[6] Andre Michel, Hickman A John, Hassel Dieter. Driving Cycles for Emission Measurements Under European Condition[C]. SAE Paper 950926.

[7] Shi Shuming, Zou Guilin, Liu Li, et al. Study on the Fuzzy Clustering Method of the Microtrips for Passenger Car Driving Cycle in Changchun[C]. Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009: 1555-1560.

[8] 陈超,邹滢. SPSS15.0 中文版常用功能与应用实例精讲[M]. 北京: 电子工业出版社,2008: 263-264.

[9] 王殿海,杨少辉,张海霞,等. 交通流理论[M]. 北京: 人民交通出版社,2002: 13-51.

(上接第249页)

(2) 在三维数值声学模拟中,全吸声边界的声阻抗可定义为 $Z_s = \rho_0 c_0$ 。

(3) 针对进气谐振腔共振频率传统理论计算公式,提出了考虑开口端影响的修正公式,将共振频率计算误差控制在2%以内。

(4) 是否考虑开口端修正问题,对1/4波长管共振频率的理论计算而言,影响不大。

(5) 进气谐振腔安装位置的选择,可依据进气系统的空腔声学模态振型来确定。

参考文献

[1] Bozza F, Gimelli A, Pianese V, et al. An Acoustic Design Procedure for Intake Systems: 1D Analysis and Experimental Validation[C]. SAE Paper 2004-01-0412.

[2] Athavale S M, Sajanpawar P R. Analysis and Development of In-line Helmholtz Resonator Through Computer Simulation for Elimination of Low Frequency Intake Noise Character[C]. SAE Paper 1999-01-1662.

[3] 马大猷. 声学基础(下册)[M]. 北京: 科学出版社,1980.

[4] Trochon E P. A New Type of Silencers for Turbocharger Noise Control[C]. SAE Paper 2001-01-1436.

[5] Selamet A, Dickey N S, Novak J M. The Herschel-Quincke Tube: A Theoretical, Computational, and Experimental Investigation[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1994, 96(5): 3177-3185.

[6] 庞剑,谌刚,何华. 汽车噪声与振动——理论与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社,2006: 198-203.

[7] Shaw C E, Moenssen D J, Kostun J D. A Correlation Study of Computational Techniques to Model Engine Air Induction System Response Including BEM, FEM and 1D Methods[C]. SAE Paper 2003-01-1644.