

基于小波分析的城市道路行驶工况构建的研究^{*}

姜平¹, 石琴¹, 陈无畏², 黄志鹏¹

(1. 合肥工业大学交通运输学院, 合肥 230009; 2. 合肥工业大学机械与汽车学院, 合肥 230009)

[摘要] 根据我国混合交通的特点, 采用离散小波变换的多分辨信号分解算法对汽车实际行驶工况数据进行压缩重构, 将重构后的数据划分为很多短行程, 根据速度和加速度等特征参数, 构建了城市道路代表性行驶工况。接着以合肥市典型道路为例进行了实际应用, 并建立了 11 个行驶工况评价准则。最后把构建的行驶工况与用传统方法确定的行驶工况和国外行驶工况进行了对比分析, 结果表明应用小波分析法构建的代表性行驶工况能更真实地反映我国城市道路实际行驶工况。

关键词: 道路; 行驶工况; 离散小波变换

A Research on the Construction of City Road Driving Cycle Based on Wavelet Analysis

Jiang Ping, Shi Q, Chen W u e i & Huang Z h i p e n g

1. School of Transportation Engineering Hefei University of Technology Hefei 230009

2. School of Mechanical and Automotive Engineering Hefei University of Technology Hefei 230009

[Abstract] According to the characteristics of mixed traffic in China, and by using the multiresolution signal decomposition algorithm of discrete wavelet transform, the actual driving data are compressed, reconstructed and divided into many short trips, and then the city road representative driving cycle is constructed based on characteristic parameters such as speed and acceleration etc. Then the method is applied to the typical roads in Hefei city and 11 evaluation criteria for driving cycle are established. Finally the driving cycle constructed is compared with the driving cycle created by traditional method and foreign driving cycles FIP 75 and ECE 15. The results show that the representative driving cycle constructed using wavelet analysis can more truly reflect the real driving condition on city roads in China.

Keywords: road; driving cycle; discrete wavelet transform

前言

城市车辆行驶工况、环境等的变化对汽车燃料消耗、污染物排放、汽车运行经济性和环境保护有着重要的影响。因此, 开展我国大中城市汽车行驶工况的研究十分必要。

目前国内很多学者采用短行程和聚类分析法直接对实验数据进行城市道路代表性行驶工况的构建^[1-4]。国外学者对行驶工况实验数据采用随机方

法和微路径方法构建行驶工况^[5-6]。本文中根据我国混合交通的特点, 考虑了路面干扰引起的速度变化波动, 把汽车行驶工况看作一个随时间变化的离散信号, 采用多分辨信号分解算法, 提取了数据中的规则性, 选择合适的交通原始数据采集路段, 对收集的汽车实际行驶工况数据进行压缩重构, 把重构后的数据划分为很多小的短行程, 根据速度和加速度等特征参数, 组合成能够反映城市实际交通的行驶工况。

* 国家自然科学基金(70771036)、安徽省自然科学基金(090414162)和合肥工业大学校基金(080205F)资助。

原稿收到日期为 2009 年 11 月 4 日, 修改稿收到日期为 2010 年 3 月 24 日。

1 混合交通

由机动车和自行车等非机动车组成的混合交通是我国城市交通的主要特征。据统计,以自行车为主的非机动车占交通总量的 25%~55%。由于各自驾驶行为、速度等基本特征不同,使混合交通对城市道路行驶工况有一定影响。在我国混合交通中,机动车与非机动车,快速车与慢速车可能在同一条车道上行驶,互相干扰。因此实验时两个相邻的数据往往有一定波动。考虑到路面干扰、机非混合的情况,汽车行驶过程中的实验数据在处理过程中,按照以下原则定义加速、减速、怠速和匀速^[7]:

(1) 加速工况:汽车加速度 $a \geq 0.15 \text{ m/s}^2$ 的连续过程;

(2) 减速工况:汽车加速度 $a \leq -0.15 \text{ m/s}^2$ 的连续过程;

(3) 匀速工况: $|a| < 0.15 \text{ m/s}^2$ 的连续过程;

(4) 怠速工况:发动机工作,但车速 $v=0$ 的连续过程。

对行驶工况的实验数据经过小波变换后,消除路面干扰引起的速度波动,除去信号中繁琐和冗余的部分,利用数据规则性代替原始数据。经过小波变换的短行程的工况按以下原则定义:

(1) 加速工况:汽车加速度 $a > 0$ 的连续过程;

(2) 减速工况:汽车加速度 $a < 0$ 的连续过程;

(3) 匀速工况:汽车加速度 $a=0$ 的连续过程;

(4) 怠速工况:发动机工作,但车速 $v=0$ 的连续过程。

以合肥市 5 条典型道路为例,实验数据和进行小波变换的速度随时间变化曲线如图 1 所示。经过小波变换后短行程工况选取原则以 0 为标准,更符合实际情况。

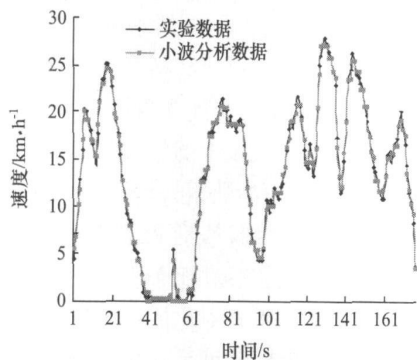


图 1 实验数据、小波分析速度曲线

2 离散小波变换数据压缩的理论基础

行驶工况与通常分析信号具有相同特性,可以看作一个随时间变化的离散小波信号。小波是小波变换的分析函数,它是在有限区间内积分为零并满足一定条件的小波函数 $\Psi(x)$ 通过伸缩和平移产生的函数族 $\Psi_{a,b}(x)$ 即

$$\Psi_{a,b}(x) = |a|^{-1/2} \Psi[a^{-1}(x-b)] \quad (1)$$

式中: a, b 分别为 $\Psi(x)$ 的尺度参数和平移参数, $a \in \mathbb{R} \setminus 0$

实际应用中经常使用离散二进制小波变换,假设 $a=2^m, b=n(m \in \mathbb{Z})$, 设 $f(t)$ 是一个给定的信号,离散二进制小波变换定义为

$$C_{m,n}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi_{m,n}(t) f(t) dt \quad (2)$$

其中: $\Psi_{m,n}(t) = 2^{-m/2} \Psi(2^{-m}t - n)$

为了实现有限离散小波变换计算,数值计算经常采用 Mallat 提出的多分辨信号分解算法^[8]。将 $\Psi_{m,n}(t)$ 离散地表示为一对 $H=\{h_k\}$ 和 $G=\{g_k\}$ 滤波器 ($k \in \mathbb{Z}$), $\{h_k\}$ 和 $\{g_k\}$ 为对应的镜像滤波器。若离散的采样信号 $f(t)$ 表示为 $\{C(n)\}$, n 为采样点序号,文中行驶工况的实验数据速度时间序列 $v^{(0)}$ 视为尺度 0 的原始信号,则正交小波分解可以写成:

$$v^j(n) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} h(k-2n) v^{j-1}(k) \quad (3)$$

$$D^j(n) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} g(k-2n) \times D^{j-1}(k) \quad (4)$$

式中: $v^j(n)$ 为 2^j 分辨率下的离散逼近; $D^j(n)$ 为 2^j 分辨率下离散细节,是该分辨率下的小波变换系数, $j=0, 1, \dots, J$ 为最高分解级次。

将原始信号 $v^{(0)}$ 分解为两部分,即离散逼近 $v^{(1)}$ 和离散细节 $D^{(1)}$,然后再对离散逼近信号进行进一步分解,得到分解结果 $\{v^{(j)}, D^{(j)}, D^{(j-1)}, \dots, D^{(1)}\}$ 。反过来,由于分解的正交性,由 $v^{(j)}$ 和 $D^{(j)}, D^{(j-1)}, \dots, D^{(1)}$ 可以重构得到原始信号 $v^{(0)}$ 为

$$v^j(n) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} h(n-2k) v^j(k) + \sum_{k \in \mathbb{Z}} g(n-2k) D^j(k) \quad (5)$$

按照上述原理对汽车行驶工况信号进行小波变换,得到相应的小波分析系数,对高频系数进行阈值处理,每一尺度的高频信号选择不同阈值。高频小波变换系数阈值根据相应尺度上小波变换系数的最大绝对值来确定。各尺度上保留绝对值大于等于阈值的系数。

3 行驶工况特征参数的确定

行驶工况是指一段车速变化历程,其主要参数如平均车速、怠速行驶时间等应和所在地区的实际交通状况一致或尽量接近。行驶工况表示为速度时间曲线。汽车换挡、速度选择、加速和减速对汽车燃油消耗有很大影响,因此车辆在道路上的行驶状况是通过一些能够反映其运动特征的参数,如加速、减速、匀速和怠速等来表示。

行驶工况构建就是运用数学方法,从众多的短行程中提取一些有代表性的短行程,然后用它们组合成该城市或地区的典型行驶工况。短行程是指车辆从一个怠速开始行至下一个怠速开始期间所行驶的距离。

为了选取合适的代表性行驶工况,且能真实地反映道路实际行驶工况,定义 11 个特征参数作为评价基准,从所有组合短行程中选择与实验数据特征参数平均相对误差最小的为代表性行驶工况。这 11 个特征参数包括:加速时间比例 P_a 、怠速时间比例 P_i 、匀速时间比例 P_u 、减速时间比例 P_d 、平均速度 V_a 、平均行驶速度 V_m 、加速段平均加速度 a_a 、减速段平均减速度 a_d 、最大加速度 a_{max} 、最小减速度 a_{min} 和平均加速度 a 。

4 数据采集和处理

4.1 实验原则

车辆行驶工况主要受道路类型、车道数量、交通条件和车型的影响,道路的选择应能综合反映该城市道路的整体交通状况。道路调查是开发车辆行驶工况的最基础阶段,交通状况调查包括车辆交通状况和道路情况,即观察路面状况和环境条件。其目的是从众多道路中筛选出代表性实验路线,能够以少量实验获得全局特征的统计结果。

合肥市道路按照等级可分为主干道、次干道、快速路和支路。按照车道数,可分为单车道、双车道、三车道、四车道、六车道和八车道等。在充分考虑道路等级、车道数量、机非混合、车辆流量、饱和度、交叉口密度(路段内交叉型式和数量)、早晚交通流量变化明显程度和对城市污染等因素的影响下,选择了合肥市 5 条典型道路进行测试,包括交通量大和交通量小的路段。每条测试路段连续采样 14 天,包括星期六和星期日。采样时间为每天上午 7:30 ~

11:30 下午 13:00 ~ 17:00。实验选择驾驶经验丰富的驾驶员,在所选道路上每天往返行驶 12 次。

轿车在城市机动车中保有量最大,本次研究以轿车为研究对象。驾驶员采用固定路线跟车法,跟随测试路段上的车流行驶,保持一定车距,不强行超车,不脱挡滑行,正常驾驶进行数据采集。根据上述原则,文中选取合肥胜利路、屯溪路和明光路等 5 条典型道路进行实验。

4.2 实验仪器

汽车行驶工况调查所需的设备包括轿车、速度传感器、雷达测速器、蓄电池、汽车性能综合测试仪和数码摄像机,进行数据采集、车速收集和行驶路线路况收集。其它设备还有录音机、秒表、气压计、湿温度计、卷尺等,纪录到达路段起始时刻、堵车时刻、当天的大气气压、风速、当天的环境温度和湿度,测量实验道路特征。

4.3 数据处理

采用 Daubechies 离散小波对实验数据进行 3 尺度分解,小波分解结构如图 2 所示,得到尺度 3 的低频系数和尺度 3 2 1 的高频系数。图 2 的 1~2 329 S 段(长度 2 329 S)是尺度 3 的低频系数,2 330~4 658 S 段(长度 2 329 S)是尺度 3 的高频系数,4 659~9 316 S 段(长度 4 658 S)是尺度 2 的高频系数,9 317~18 632 S 段(长度 9 316 S)是尺度 1 的高频系数。

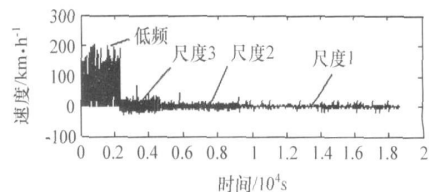


图 2 小波分解尺度 3 的低频系数和尺度 3 2 1 的高频系数

对压缩数据利用小波重构恢复数据。对重构后速度数据与实验数据的压缩效果进一步分析,采用绝对值、相对比值和压缩重建精度来评价。

(1) 逐项计算重构后速度数据与实验速度数据差值的绝对值,此值大于 1 的仅占 1.24%。

(2) 逐项计算原始数据与重构数据速度间的绝对差值,除以原始数据值后得到相对比值,仅有 6.6% 的重构数据的相对比值超过了 5%。约有 52.22% 的重构数据的相对比值在 0 和 1% 之间。

(3) 压缩重建精度可采用归一化均方根误差 NRMSE 表示为

$$NSRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x'_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}$$

(6)

式中: n 为数据点数; x_i 为原始信号; x'_i 为压缩恢复数据; \bar{x} 为原始信号平均值。归一化均方根误差为 0.03。

上述评价指标表明所用的压缩方法具有较低的失真度, 压缩后的数据可以完全代替原始数据, 信号重构质量高。

5 构建代表性行驶工况

汽车行驶工况一般可用特征参数来描述, 为了评定压缩重构后的行驶工况的重要特征是否能代表实验数据, 计算二者的特征参数如表 1所示。由表可见, 二者特征参数接近, 表明压缩重构后的行驶工况能很好地反映实验数据的行驶工况。

表 1 合肥市典型道路实验数据与压缩重构后数据特征参数比较

特征参数	实验数据	压缩重构后数据
$v_m / \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	25.3	25.3
$v_{mr} / \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	28.75	28.74
$a_a / \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	0.6	0.58
$a_d / \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	-0.6	-0.57
$P_a / \%$	30.97	30.51
$P_i / \%$	11.99	11.97
$P_c / \%$	23.87	24.62
$P_d / \%$	33.17	32.9
$a_{max} / \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	2.20	2.17
$a_{min} / \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	-2.27	-2.33
$a / \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	0	0.0017

为进一步构建代表性行驶工况, 采用上述 11个特征参数来提取代表性行驶工况, 如表 2和图 3所示。可以看出, 与传统方法的代表性工况相比, 经过小波变换后合成的代表性工况的特征参数与表 1实验数据的平均相对误差小, 仅为 2.88%, 更能反映合肥地区的实际道路交通状况。

合肥市实际行驶工况与经过小波变换后的代表性行驶工况、欧洲 ECE15和美国的 FTP75的比较见表 3。可以看出, 合肥典型道路实际行驶工况介于 3种工况之间, 更接近小波压缩后合成代表性工况。平均速度、加速时间比例、减速时间比例明显高于 ECE15行驶工况, 平均行驶速度接近 ECE15行驶

表 2 合肥市典型道路实验数据与代表性行驶工况特征参数比较

特征参数	小波方法合成代表性工况	传统方法合成代表性行驶工况
$v_m / \text{km} \cdot \text{h}$	25.94	25.08
$v_{mr} / \text{km} \cdot \text{h}$	29.5	27.65
$a_a / \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	0.62	0.64
$a_d / \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	-0.61	-0.57
$P_a / \%$	30.22	32.54
$P_i / \%$	12.15	9.31
$P_c / \%$	23.06	21.99
$P_d / \%$	34.57	36.16
$a_{max} / \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	2.2	1.73
$a_{min} / \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	-2.23	-2.2
$a / \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	0	0

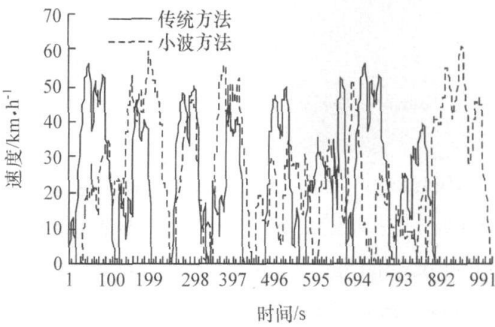


图 3 传统方法与小波方法合成代表性行驶工况

表 3 合肥市典型道路代表性行驶工况与 3种标准模式下行驶工况比较

特征参数	实际行驶工况	小波变化后合成工况	ECE15	FTP75
$v_m / \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	25.3	25.94	18.7	34.07
$v_{mr} / \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	28.75	29.5	26.51	41.63
$a_a / \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	0.64	0.62	0.642	0.592
$a_d / \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	-0.6	-0.61	0.748	0.686
$P_a / \%$	30.97	30.22	21.57	33.4
$P_i / \%$	12.02	12.15	30.68	18.01
$P_c / \%$	23.84	23.06	29.27	19.55
$P_d / \%$	33.17	34.57	18.49	28.88

工况, 比 FTP75行驶工况低。怠速、匀速比例小于 ECE15行驶工况, 与 FTP75工况差别很大, 若采用国外行驶工况来评价我国城市在用车的污染物显然不能反映出我国道路实际行驶状况, 因此, 建立我国城市道路行驶工况是十分必要的。

(下转第 51页)

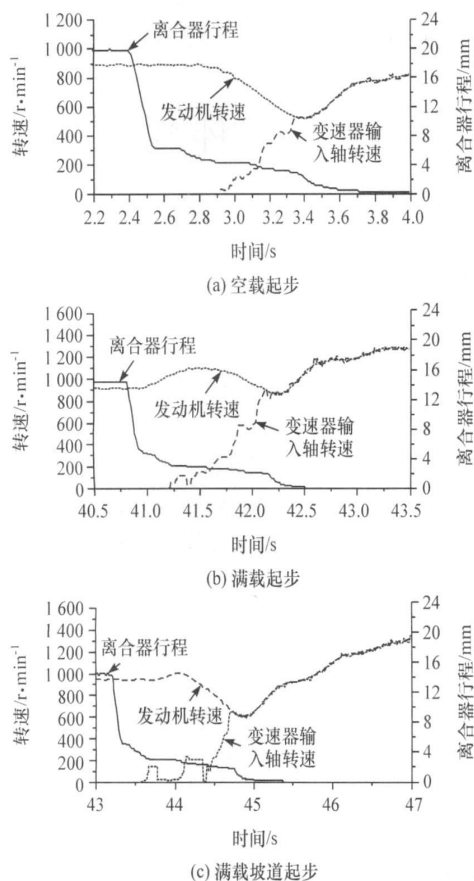


图 10 不同路况下的车辆起步试验

本特性,对改装后离合器操纵系统的离合器结合、分离速度与流量阀控制占空比的对应关系进行了试验分析。在此基础上,结合起步过程中离合器不同阶段的工作特点,制定了车辆起步过程的离合器自动控制策略,并在试验车辆上进行了验证,证明了离合器自动操纵机构及控制策略的实用性。

参考文献

- [1] 席军强,丁华荣,陈慧岩. ASCS与AMT的历史、现状及其在中国的发展趋势[J]. 汽车工程, 2002, 24(2): 89—93.
- [2] 何忠波,白鸿柏. AMT技术的发展与展望[J]. 农业机械学报, 2007, 38(5): 181—186.
- [3] 张炳力,赵韩,金朝勇,等. 汽车自动变速器研究现状及展望[J]. 中国机械工程, 2006, 17(增刊 2): 417—420.
- [4] 张泰,葛安林,郭立书,等. 改善车辆起步换挡品质提高乘坐舒适性的研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(1): 18—24.
- [5] 江发潮,陈全世,曹正清. 机械式自动变速器的离合器优化控制[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(2): 242—245.
- [6] 黄建明,曹长修,苏玉刚. 汽车起步过程的离合器控制[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2005, 28(3): 91—94.
- [7] 陈家瑞. 汽车构造[M]. 北京:机械工业出版社, 2000.
- [8] 刘海鸥,陈慧岩,金亚英,等. 液压式离合器自动操纵机构在AMT车辆中的控制研究[J]. 液压与气动, 2005(10): 18—20.
- [9] 何忠波,李国章,张培林,等. 起步过程中离合器半结合点的实验研究[J]. 军械工程学院学报, 2002, 14(2): 43—47.
- [10] 王洪亮,刘海鸥,陈慧岩. 越野车辆的自动变速系统[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(3): 214—218.

(上接第 73 页)

6 结论

(1) 充分利用小波压缩和数理统计相结合的方法,提出了一种新的典型道路实际行驶工况构建方法,为构建我国汽车实际行驶工况提供新的思路。

(2) 从压缩后的实验数据选取了 2 000 个短行程,并比较了 11 个特征参数的值,尝试了一种新的加速、减速、怠速和匀速工况的划分标准,得到了一个基于城市典型道路的实际速度、加速度等特征参数的行驶工况。

(3) 文中方法消除了实验时路面干扰因素的影响,压缩重构后提取的代表性行驶工况与实验数据特征参数相比,误差均小于 5%,能反映合肥地区交通实际情况。

(4) 得到合肥市典型道路的行驶特征,汽车加速减速频繁,行驶速度中等,平均减速度偏小。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 杨延相,蔡晓林,杜青,等. 天津市道路汽车行驶工况的研究[J]. 汽车工程, 2002, 24(3): 200—204.
- [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] 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.
- [5] Lin Jie. A Markov Process Approach to Driving Cycle Development[J]. California University, 2002.
- [6] Eva Ericsson. Variability in Urban Driving Cycle Patterns[J]. Transportation Research, 2000, D5: 337—354.
- [7] 杜洪. 汽车排放测试循环及道路排放特性的研究[D]. 天津:天津大学, 2001.
- [8] 周金刚,金少先,陈红兵,等. 小波多分辨分析用于化学发光光谱的噪声滤除[J]. 光谱学与光谱分析, 2000, 20(2): 216—218.