

不同交通方式的道路利用效率测度方法

蒋 芑, 贾晓峰, 柏章明
(天津市公用事业设计研究所 天津 300100)

摘要: 道路交通拥堵问题的根本原因之一是交通量与道路面积之间的矛盾, 而如何从微观角度定量测度不同交通方式的道路利用效率, 尚没有成熟、公认的方法。围绕不同道路交通方式的客运周转量与运输过程占用的道路面积之间的关系, 提出一种定量分析不同交通方式道路利用效率的测度方法。该方法反映了不同交通方式的载客量、运输距离、运输速度、运输过程的占路面积和占路时间等要素对道路交通的影响和作用机理。基于天津市GPS车辆行驶数据, 以小汽车、“步行+公交”出行方式为例, 具体阐述该测度方法的应用。结果显示, 完成同样运输量, 小汽车道路占用面积是公共汽车的7倍。

关键词: 道路交通; 道路利用效率; 测度方法; 客运交通; 路谱曲线; 交通拥堵

Measuring Roadway Utilization Efficiency for Different Travel Modes

Jiang Peng, Jia Xiaofeng, Bai Zhangming

(Tianjin City Public Utility Design and Research Institute, Tianjin 300100, China)

Abstract: One of the fundamental causes of traffic congestion is the imbalance between traffic demand and roadway space. However, there still lacks feasible and well-recognized methodology for measuring roadway utilization efficiency of different travel modes. Grounded on the relationship between passenger kilometers and their corresponding roadway space occupancy for different travel modes, this paper proposes a method to quantitatively measure roadway utilization efficiency of different travel modes. The proposed method captures the impacts of various factors, including passenger capacity, travel distance, travel speed, space and time occupancy of roadway on roadway traffic and their interaction mechanisms. Taking “car” and “walking + public transit” modes as examples, the paper elaborates the application of the proposed methodology using vehicular GPS data of Tianjin urban area. Results show that private cars occupy 7 times of road space as that by buses to achieve the same passenger volume.

Keywords: road traffic; roadway utilization efficiency; measuring method; passenger transportation; road spectrum curve; traffic congestion

收稿日期: 2014-01-01

资助项目: 天津市建设与交通委员会项目“交通测度技术及其在公交运营管理中的应用”(2012-软28)。

作者简介: 蒋芑(1955—), 男, 天津人, 高级工程师, 主要研究方向: 城市交通规划与管理研究。

E-mail: richontjip@126.com

0 引言

城市交通问题中, 道路交通拥堵问题最为突出, 其根本原因之一是交通量与道路面积之间的矛盾^[1-3]。不同交通方式的运载量、道路占用面积、运行速度等不同, 因此道路利用效率也各异, 若采用道路利用效率高的交通方式, 则完成相同运输量所占用的道路面积和时间更少, 可降低道路交通拥堵程

度。因此, 如何科学、全面地评价各种交通方式、不同交通状态下的道路利用效率, 便成为缓解交通拥堵问题的基础工作。

目前城市交通规划、管理中的综合评价^[2-6], 多是从宏观角度对规划管理方案进行考评; 偏重于以机动车效率为主、以道路通行能力为追求目标, 对其他交通影响因素考虑不足。在理论研究方面, 已有道路利用效率测度分析^[1-3, 5-6]多聚焦于宏观政策或具体道路,

有关公共交通效率的研究^[4-5, 7-8]也多为宏观、定性评价为主, 均不涉及具体交通方式运输过程或不同状态的道路利用效率测度方法。虽然业内公认公共交通运输效率高、小汽车运输效率低, 但如何从微观角度对不同交通方式的道路利用效率进行定量测度、评价, 尚没有成熟、公认的方法。城市道路交通中, 客运交通量占主要部分且出行方式复杂, 是造成道路交通拥堵的主要原因, 本文从城市道路客运交通的运输效果与运输过程占用道路面积的需求关系入手, 建立一种适用于不同交通方式的道路利用效率定量分析方法, 并以天津市为例进行道路利用效率计算。

1 道路利用效率基本测度方法

交通运输的目的是将一定量人(或物体), 从出发地运送至目的地。在这一过程中需要占用道路资源, 若选用的交通方式运载量越大、速度越快、运输时间越短, 则运输同样人(或物体)所占用道路的时间和面积越少, 即道路利用效率高, 而道路利用效率越高, 则越不易造成道路拥堵。

对不同客运交通方式的道路利用效率计算方法定义如下:

1) 某交通方式的客运周转量

$$F = ML, \quad (1)$$

式中: F 为客运周转量/(人·m); M 为某交通方式在运输过程中的有效载客量/人, 出

租汽车驾驶人不计为有效载客量; L 为有效运输距离/m, 即将载客量 M 从出发地运输至目的地的最短可行距离(绕行距离属于无效运输距离, 不计入)。

2) 某交通方式在完成客运周转量 F 的过程中所占用的道路面积

$$P = \sum(s_j \Delta t_j), \quad (2)$$

式中: P 为道路占用面积/(m²·s); s_j 为某交通方式在行驶状态 j 时刻的道路占用面积/m², 不同交通方式的 s_j 各异, 且随速度 v 的不同而不同, 一般表示为 $s(v)$; Δt_j 为 s_j 状态下的行驶时间/s。

3) 将某交通方式在单位时间使用单位道路面积所完成的客运周转量定义为该交通

方式的道路利用效率 $\eta_i / ((\text{人} \cdot \text{m}) \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1})$:

$$\eta_i = F / P = ML / \sum(s_j \Delta t_j), \quad (3)$$

s_j 不变时(如车辆匀速行驶),

$$\sum(s_j \Delta t_j) = s \sum \Delta t_j = sT, \quad T = \sum \Delta t_j,$$

则有

$$\eta_i = F / P = ML / sT. \quad (4)$$

对于一个交通瞬间状态, 可认为 s_j 不变, 此时该交通方式的道路利用效率

$$\eta_{it} = F / P = M \Delta L / s \Delta t, \quad (5)$$

因为 $\Delta L / \Delta t = v$, 所以有

$$\eta_{it} = Mv / s, \quad (6)$$

式中: v 为瞬间状态的行驶速度/(m·s⁻¹); s 为某交通方式在行驶状态 v 时的道路占用面积/m²。

例如, 某自行车(载客量为1人)以11 km·h⁻¹ (3.06 m·s⁻¹)的速度行驶时, 其最小安全车头间距为6 m, 最小安全侧距为1.3 m(含车宽), 此时自行车的道路占用面积 $s = 6 \times 1.3 = 7.8 \text{ m}^2$, 此状态自行车的道路利用效率 $\eta_{it} = Mv / s = (1 \times 3.06) / 7.8 = 0.39 (\text{人} \cdot \text{m}) \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 。

一般情况, 某交通方式在行驶状态 j 时刻的道路占用面积

$$s_j = h_j a_j, \quad (7)$$

式中: h_j 为某交通方式在行驶状态 j 时的最小安全车头间距/m; a_j 为某交通方式在行驶状态 j 时的最小安全侧距/m。一般地, h 和 a 随行驶速度 v 改变, 有 $h = h(v)$ 和 $a = a(v)$, 则

$$s_j = s(v_j) = h(v_j) a(v_j), \quad (8)$$

$$\eta_i = F / P = ML / \sum(s_j \Delta t_j) = ML / \sum[h(v_j) a(v_j) \Delta t_j]. \quad (9)$$

若某一交通方式的行驶过程连续, 且行驶速度 v 可以表示为时间 t 的函数, 即 $v = v(t)$, 则 $h(v)$, $a(v)$ 可表示为 $h(v) = h(t)$, $a(v) = a(t)$, 则 $s(v) = s(t) = h(t) a(t)$ 。因此, 连续行驶过程的道路利用效率

$$\eta_i = ML / \int s(t) dt = ML / \int [h(t) a(t)] dt. \quad (10)$$

2 多方式出行道路利用效率测度方法

上述道路利用效率测度方法是针对单一出行方式进行计算, 而实际中经常出现多方式出行的情况。例如公共交通出行, 往往是步行与乘坐公共交通的组合过程, 由于步行

“载客量”为1人，而公共交通的载客量是多人，因此不能直接采用上述道路利用效率计算公式。根据道路利用效率的基本思想和式(3)，多方式出行的道路利用效率计算方法为

$$\eta_2 = \sum_i L_i / \sum_i \left[\left(\sum_j s_{ij} \Delta t_{ij} / M_i \right) \right], \quad (11)$$

式中： η_2 为多方式出行的道路利用效率/ $((\text{人}\cdot\text{m})\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1})$ ； L_i 为交通方式*i*的有效运输距离/m； s_{ij} 为交通方式*i*在行驶状态*j*时刻的道路占用面积/ m^2 ； Δt_{ij} 为交通方式*i*在行驶状态*j*下的行驶时间/s； M_i 为交通方式*i*的有效载客量/人。

以“步行+公交”为例说明其道路利用效率的计算方法。该出行过程可分解为步行过程(含换乘步行)、等车过程(含换乘等车)和乘车过程；其中乘车过程还可分解为行驶过程和停车过程。因此其道路利用效率

$$\eta_{2g} = \frac{L_{yb} + L_{yg}}{(s_{bx}t_{bx} + s_{bd}t_{bd})/M_b + (s_{gx}t_{gx} + s_{gd}t_{gd})/M_g}, \quad (12)$$

式中： L_{yb} 为步行有效距离/m， L_{yb} =平均接驳距离 $\times 2 \times$ 寻站接驳距离的有效系数+平均换乘接驳距离 \times (平均换乘系数-1) \times 换乘接驳距离的有效系数； L_{yg} 为乘坐公交的有效运距/m， L_{yg} =公交乘行距离 \times 乘行距离有效系数； s_{bx} ， s_{bd} 分别为步行和等车时的瞬间状态道路占用面积/ m^2 ； t_{bx} ， t_{bd} 分别为步行时间/s和等车时间/s， t_{bx} =[平均接驳距离 $\times 2 +$ 换乘接驳距离 \times (换乘次数-1)]/步行速度， t_{bd} =平均等车时间 \times 平均换乘系数； M_b 为步行载客量/人； s_{gx} ， s_{gd} 分别为公交行驶和停车状态下的瞬间状态道路占用面积/ m^2 ； t_{gx} ， t_{gd} 分别为公交行驶时间/s和停车时间/s，乘车过程道路占用总面积为 $\sum(s_{gx}t_{gx} + s_{gd}t_{gd})$ ； M_g 为公交平均载客量/人。

上述各变量可通过公交出行调查和公交

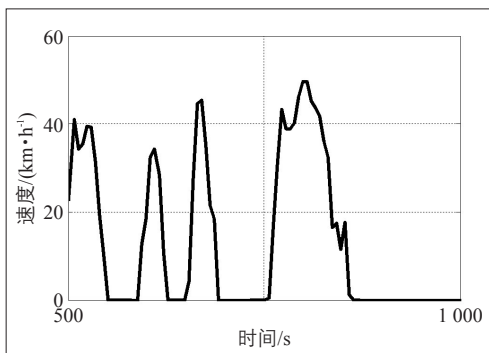


图1 小汽车行驶过程速度—时间曲线
Fig.1 Speed-time curve of traveling cars

行驶调查得到。

3 应用分析

以天津市道路为例，应用上述方法对不同客运交通方式的道路利用效率进行测度。首先，为各采样用的车辆安装GPS和行车记录仪，使采样车辆的位置、车速等信息以 $1 \text{次}\cdot\text{s}^{-1}$ 的频率发送至数据库服务器。车辆行驶数据采自2013年1—5月，其中小汽车行驶调查的抽样率为2%，公交行驶调查抽样率为0.5%，电动车、自行车行驶调查抽样率为1%。经统计分析得到不同交通方式的道路行驶规律，简称为该交通方式的“路谱”。

3.1 小汽车道路利用效率

借助采样车辆的GPS，得到小汽车在天

津市外环区域内6:30—21:00的行驶数据，其行驶的速度—时间分布见图1。可以看出，小汽车在市区内呈现脉动式行驶特性，其脉动行驶过程分为4个部分：加速、稳速、减速和停车过程。基于脉动行驶过程的统计分析，得到小汽车在市区内脉动行驶的平均周期为129 s；其中行驶时间71 s，停车时间58 s，脉动周期的平均行驶距离为526 m。

本文将小汽车脉动行驶的平均周期规律称为小汽车行驶路谱。在小汽车行驶路谱中，加速过程的平均时间为22 s，拟合函数(见图2)

$$V_{z1}(t) = 0.0013 t^4 - 0.0427 t^3 + 0.551 t^2 + 0.2434 t - 0.9528;$$

行驶路谱中平稳行驶过程的平均时间为24 s，近似匀速过程拟合函数(见图3)

$$V_{w1}(t) = 0.0034 t^4 - 0.0603 t^3 + 0.3794$$

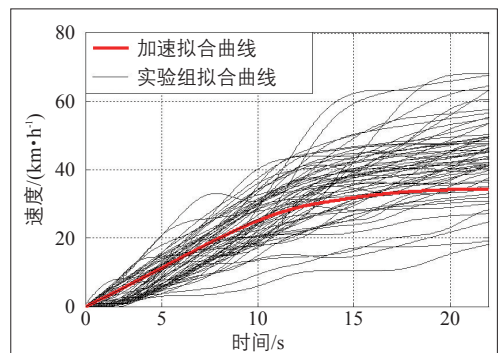


图2 小汽车加速过程路谱曲线
Fig.2 Spectrum curve of acceleration process of cars

$$t^2 - 0.473t + 27.6;$$

路谱中减速行驶过程的平均时间为 25 s, 减速过程拟合函数(见图 4)

$$V_{j1}(t) = 0.0003t^4 - 0.0082t^3 + 0.0888t^2 - 1.652t + 42.41.$$

综合上述分析, 得到天津市小汽车行驶平均一个路谱周期的拟合曲线(见图 5), 即路谱函数。路谱函数为计算小汽车行驶过程的道路占用面积提供依据, 若按小汽车行驶时的最小安全车头时距 $t_a = 2$ s、小汽车平均车长 4.5 m 计算, 则安全车头间距 $h_x = 2V(t) + 4.5$; 市区行驶的小汽车受车道标线约束, 小汽车的安全侧距 a_x 取车道宽度(3.75 m)。由此得到小汽车行驶过程瞬间状态的道路占用面积 $s_x(t) = (2V(t) + 4.5) \times 3.75$ 。

小汽车行驶一个路谱距离(526 m)的道路占用面积 p_{xlp} 为行驶过程与停车过程的道路占用面积之和, 行驶过程是加速、稳速、减速过程之和, 因此使用行驶路谱函数 $V_{z1}(t)$, $V_{w1}(t)$, $V_{j1}(t)$ 替代 $V(t)$ 。则一个路谱周期中小汽车行驶过程道路占用面积

$$p_{xlp} = 3.75 \left\{ \int_0^{22} [2(V_{z1}(t)/3.6) + 4.5] dt_z + \int_{22}^{46} [2(V_{w1}(t)/3.6) + 4.5] dt_w + \int_{46}^{71} [2(V_{j1}(t)/3.6) + 4.5] dt_j \right\}, \quad (13)$$

将 $V_{z1}(t)$, $V_{w1}(t)$, $V_{j1}(t)$ 函数式代入式(13), 计算得到 $p_{xlp} = 5144 \text{ m}^2 \cdot \text{s}$ 。同时在一个路谱周期中, 小汽车停车状态为 58 s, 根据调查, 小汽车停车状态的平均车头间距 $h_t = 5.3$ m, 侧距 $a_t = 3.75$ m, 则小汽车停车状态道路占用面积 $p_{xpt} = h_t a_t t = 1153 \text{ m}^2 \cdot \text{s}$ 。由此得到小汽车一个路谱周期的道路占用总面积 $p_{xlp} = p_{xlp} + p_{xpt} = 6297 \text{ m}^2 \cdot \text{s}$ 。

通过抽样调查, 得到天津市区内小汽车平均载客量为 1.3 人·辆⁻¹, 因此一个路谱周期的客运周转量 $F_{xlp} = ML = 1.3 \times 526 = 683.8$

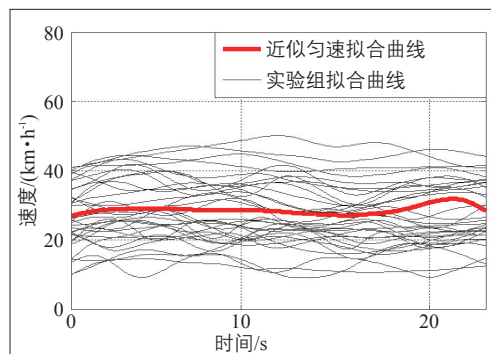


图3 小汽车近似匀速过程路谱曲线

Fig.3 Spectrum curve of cars traveling in a constant speed

人·m。

由公式(3)得到小汽车的道路利用效率

$$\eta_{xlp} = F_{xlp} / p_{xlp} = 0.11 (\text{人} \cdot \text{m}) \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}.$$

由于小汽车在城市道路按路谱周期脉动行驶, 无论行驶距离多少, 均为路谱距离的倍数, 因此小汽车不同出行距离的道路利用效率与其路谱道路利用效率相同。由此得到天津市区内小汽车道路利用效率为 $0.11 (\text{人} \cdot \text{m}) \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 。

3.2 “步行+公交”道路利用效率

通过调查得到天津市“步行+公交”出行的有关参数: 平均接驳距离为 340 m, 寻站接驳与换乘接驳距离的有效系数均为 0.7, 平均换乘接驳距离为 80 m, 平均换乘系数为 1.4, 单次公交乘行平均距离为 4 950 m, 公交乘行有效系数为 0.78, 平均载客量 $M_g = 33$ 人。得到

$$L_{yb} = 340 \times 2 \times 0.7 + 80 \times (1.4 - 1) \times 0.7 = 498 \text{ m},$$

$$L_{yg} = 4950 \times 0.78 = 3861 \text{ m}.$$

对天津市部分公交线路车辆的 GPS 数据

进行分析, 得到公交行驶路谱函数(见图 6)。行驶一个路谱周期的平均行驶距离为 322 m, 周期为 106 s。其中, 加速过程平均时间 20 s、稳速行驶过程 26 s、减速行驶过程 16 s, 停车过程平均时间 44 s。公交加速行驶过程拟合函数

$$V_{z2}(t) = 0.0018t^5 - 0.0708t^4 + 1.07t^3 - 7.905t^2;$$

公交平稳行驶过程拟合函数

$$V_{w2}(t) = -0.0017t^5 + 0.0413t^4 - 0.3995t^3 + 2;$$

公交行驶过程减速拟合函数

$$V_{j2}(t) = 0.1185t^5 - 2.532t^4 + 19.97t^3 - 73.$$

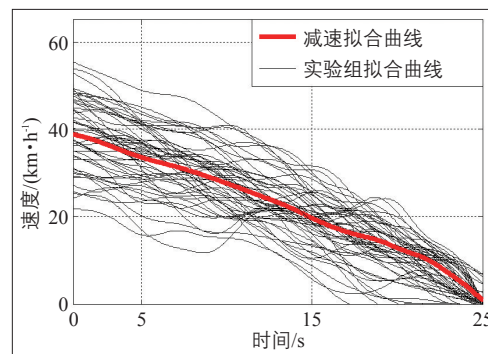


图4 小汽车减速过程路谱曲线

Fig.4 Spectrum curve of deceleration process of cars

按公共汽车行驶时最小安全车头时距 $t_a = 3\text{ s}$ ，公交车辆平均车长 10 m 计算，得到公交安全车头间距 $h_{gx} = 3v(t) + 10$ ；公交安全侧距 a_{gx} 取车道宽度 (3.75 m) 。由此得到公交行驶过程瞬间状态道路占用面积 $s_{gx}(t) = (3v(t) + 10) \times 3.75$ 。则一个周期中公交行驶过程道路占用面积

$$p_{xlpgr} = 3.75 \left\{ \int_0^{20} [3(V_{z2}(t)/3.6) + 10] dt_z + \int_{20}^{46} [3(vV_{w2}(t)/3.6) + 10] dt_w + \int_{46}^{62} [3(V_{j2}(t)/3.6) + 10] dt_j \right\}, \quad (14)$$

将 $V_{z2}(t)$ ， $V_{w2}(t)$ ， $V_{j2}(t)$ 函数式代入式 (14)，计算得到公交一个路谱距离 (322 m) 的道路占用面积 $p_{xlpgr} = 7815\text{ m}^2 \cdot \text{s}$ ，则单次公交乘行距离 4950 m 的道路占用面积 $= 7815 \times (4950/322) = 120137\text{ m}^2 \cdot \text{s}$ 。

经调查得到，步行平均速度为 $4.3\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ($1.2\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)，此步行速度下行人前后的平均安全距离为 2.6 m 、安全侧距为 1 m ，因此步行瞬间状态的道路占用面积 $s_{bx} = 2.6\text{ m}^2$ ；乘客等车状态(最低舒适)的道路占用面积 $s_{bd} = 0.66\text{ m}^2$ ；步行时间 $t_{bx} = [340 \times 2 + 80 \times (1.4 - 1)] / 1.2 = 593\text{ s}$ ；平均等车时间为 8.9 min (534 s)，因此 $t_{bd} = 534 \times 1.4 = 748\text{ s}$ 。

将上述各值代入式(12)，得到“步行+公交”道路利用效率

$$\eta_{2g} = (498 + 3861) / [(2.6 \times 593 + 0.66 \times 748) + 120137/33] = 0.77(\text{人} \cdot \text{m})(\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}。$$

3.3 小结

利用此方法同理可得到天津市区内电动车道路利用效率为 $0.38(\text{人} \cdot \text{m})(\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ，自行车为 $0.34(\text{人} \cdot \text{m})(\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ，步行为 $0.48(\text{人} \cdot \text{m})(\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 。

在天津市目前的道路条件下，公共汽车道路利用效率为 $0.77(\text{人} \cdot \text{m})(\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ，而小

汽车道路利用效率仅为 $0.11(\text{人} \cdot \text{m})(\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ，即完成同样运输量，小汽车出行道路占用面积是公共汽车的7倍、电动自行车出行的近4倍。载客量小、道路占用面积大的小汽车出行大量增加，严重挤占了原本十分稀缺的道路资源，势必造成道路交通拥堵，且导致空气严重污染。

4 结语

本文提出一种计算不同交通方式道路利用效率的理论与方法，从机理上反映不同交通方式的载客量、运输距离、运输速度、运输过程的占路面积和占路时间等交通要素对交通运输效率的影响，并将各种交通方式、交通状态、交通过程在统一的测度单位和测度模型中进行道路利用效率的定量分析，使它们具有可比性，以此定量鉴别优劣，为解决交通拥堵问题以及交通规划、管理、控制等提供定量分析手段，并可用于交通方案的定量评价和交通动态仿真分析。值得一提的是，本文提出的方法不仅可用于测度客运交通方式的道路利用效率，还可用于货运交通，以及轨道交通、航空等其他交通领域的交通资源利用效率的测度。

参考文献:

References

- [1] 魏立夏. 城市路网交通运行效率评估研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2012.
Wei Lixia. Urban Road Network Traffic Operating Efficiency Assessment [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2012.

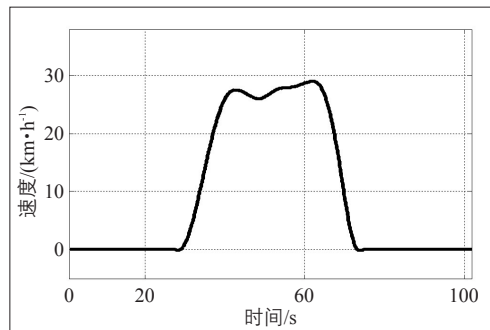


图5 小汽车行驶平均一个路谱周期的拟合曲线
Fig.5 Fitted curve of cars driving in an average road spectrum cycle

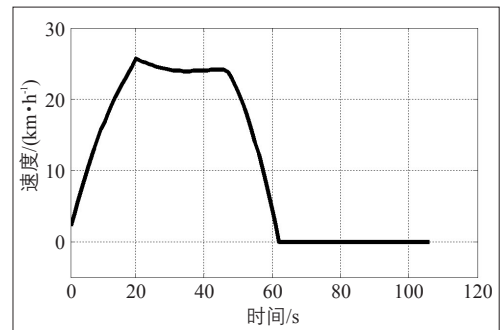


图6 公交行驶平均一个路谱周期的拟合曲线
Fig.6 Fitted curve of buses driving in an average road spectrum cycle

(下转第69页)