

基于实测数据的交通流模型比较研究¹⁾

林展熙 郭明旻 郑贤清 吴胜春 吴 正²⁾

(复旦大学力学与工程科学系, 上海 200433)

摘要 依据上海延安高架路段的交通流录像资料提取的 26 000 余组实测数据, 作出流量-密度图, 发现随着路段整体平均密度的递增, Kerner 指出的低密度自由流阶段的曲线特性越来越不明显; 而在整体平均密度较低的情况下, 又存在一定数量的高速度高密度数据. 利用观测得到的大量数据, 在按密度划分的不同区间内对已有的多个平衡函数进行最优筛选, 得到分段平衡函数的表达式, 使交通流模型更加贴近真实交通状况. 最后提出了基于实测数据计算激进型驾驶者比例的方法, 该方法的关键在于利用各种经过特征值变换后的平衡函数形式模拟已有数据的区域边界.

关键词 交通流模型, 实测数据, 流量-密度图, 分段平衡函数, 激进型驾驶者

中图分类号: O39, U491.112 文献标识码: A 文章编号: 0459-1879(2010)05-0848-08

引 言

交通流模型, 是表示交通流状态变量随时间空间变化的规律, 研究高速道路和道路网上各种复杂交通现象的基本数学工具. 交通流模型的建立需要依赖对实际交通现象的大量实测和深入分析, 其应用阶段更需要依赖实测数据来辨识各种参数. 而实测的基本要求之一是可重复性, 即能够在接近相同的条件下重复进行大量次数的测量, 再通过统计分析等手段得到模型或参数.

已有的交通流参数实测技术包括: 流量(交通量)测量, 它可以通过人工采集、安装固定探测器自动采集、卫星或航空拍摄等途径完成; 地点车速测量, 可以通过探测器^[1]或监控装置自动测量, 也可以人工测量, 区间车速则一般通过流动车测试法等方法获得, 重复测量比较困难; 大范围交通流密度的测量, 需要通过对卫星或航空拍摄照片的图像识别解决, 空间尺度较小的路段则常用出入流量法等方法换算. 本文采用基于录像资料的实用测量方法, 在方便、准确地收集路面的各种观测变量后, 展开交通流模型的各种分析研究.

在复杂交通模型测量研究领域, Kerner, Helbing 等的工作居于国际领先地位, 他们依据固定探测器记录的高速道路流量、速度数据, 提出了交通

流的非线性二维流密关系模型^[2]和一系列描述高速道路复杂交通现象的新概念^[3-8]. Li 等^[9]提出了近同步流的观点, 指出非线性流密关系也存在于低密度区域.

在宏观交通流微分方程模型中, 影响最大的当推 Payne-Whitham 模型^[10]. 近来, 朱辉等^[11]采用 Payne 模型作为车流加速度模型对三车道扰动演化进行研究, 在考虑车辆变道因素后引进含源汇项的连续性方程, 其无量纲形式为

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \rho_i \frac{\partial u_i}{\partial x} + u_i \frac{\partial \rho_i}{\partial x} = S_i(x, t), \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x} + \frac{a^2}{\rho_i} \frac{\partial \rho_i}{\partial x} = \frac{1}{Tr} (U_{e,i} - u_i), \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

$$U_{e,i} = \min\{1, 1.94 - 6\rho_i + 8\rho_i^2 - 3.93\rho_i^3\}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

其中 ρ, u 分别为交通流的密度和速度, t, x 分别为时间和空间坐标, U_e 为平衡速度, Tr 为反应时间, a 为等效声速.

对于扰动传播和发展问题而言, 方程 (2) 右端的平衡函数项对数值模拟有明显的作用^[12]. 除了式 (3) 之外, 也可以采用另外一些平衡函数表达式^[10,13-18], 这些表达式都是用“速度-密度”关系 $v(\rho)$ 表示的, 为了便于和实测数据进行比较运算,

2009-03-10 收到第 1 稿, 2010-04-27 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金资助项目 (10772050).

2) E-mail: wuzheng@fudan.edu.cn

文中均改写成“速度-车头间距” $v(h)$ 的形式,其中速度 v 的单位为 m/s,车头间距 h 是密度的倒数,单位为 m. 写成有量纲形式为

$$v = u_f e^{-h_m/h}, \quad v > u_m \quad (4)$$

$$v = u_f [1 - (h_j/h)^{0.75}] \quad (5)$$

$$v = u_f [1 - (h_j/h)^{0.9}] \quad (6)$$

$$v = u_f (1 - h_j/h) \quad (7)$$

$$v = u_f \cdot \min\{1, 1.94 - 6(h_j/h) + 8(h_j/h)^2 - 3.93(h_j/h)^3\} \quad (8)$$

$$v = u_m \cdot \ln(h_j/h), \quad \rho > \rho_m \quad (9)$$

$$v = u_f \cdot \left[\frac{1}{1 + \exp\left(\frac{100h_j - 25h}{6h}\right)} - 0.000\,003\,72 \right] \quad (10)$$

$$v = u_f (1 - h_j/h) / (1 + h_j^4/h^4) \quad (11)$$

本文将式(4)~(11)分别称为 Underwood 函数、一维管道函数(交通状态指数取 2.5 和 2.8)、Green-shields 函数、Payne 函数、Greenberg 函数、Kerner-Konhauser 函数以及 LEE 函数. 其中 u_f 为畅行速度, ρ_j 为堵塞密度, $h_j = 1/\rho_j$, ρ_m 为临界密度, u_m 为临界速度, $h_m = 1/\rho_m$.

目前所能看到的关于交通流模型的文章,人都把关注的重点放在利用交通流模型解释交通现象和特性上,本文则尝试从实际测量出发进行研究,在实测数据中作出流量-密度图,对比借鉴 Kerner 的多车道流量-密度模型,指出一些符合中国现实交通状况的现象. 同时,实测数据能给交通流模型的研究一定的支持和启发:在宏观微分模型方面,提出

一种基于大量数据统计特性的准则对比研究已有的平衡函数模型,从中筛选出具有与实测数据最优拟合程度的平衡函数,给出分段平衡函数的表达式,这样得到的交通流模型更加贴近中国的真实交通状况;在元胞自动机模型方面,给出激进型驾驶者划分准则的分析.

1 实测数据及其统计分析

为了获得本文所需数据,作者于 2008 年先后进行了 9 次共 42 h 的实际拍摄,得到上海延安高架路段的交通流录像资料,然后利用自行开发的计算机软件按照 0.8 s 的时间间隔从部分录像中提取出 26 000 余组“车速-车头间距”数据对. 该路段基本没有坡度和弯曲,并且进出口匝道距离都在 200 m 以上,其影响可以忽略,具有典型平直路段特征. 在拍摄的录像资料中,包括上下班高峰时段、普通时段和雪天 3 种状况,提取的数据也分为这 3 个不同样本,其中表 1 给出了雪天数据样本的实测频数表,其余两个样本也有类似结果,这里不一一列出. 下文中提及这 3 段数据时分别称为晴天高峰、晴天低谷和雪天数据.

从表 1 中可以看到,按车头间距大小区分的每一组数据(即表中每一行)都有一个频数的峰值,并且几乎在所有分组中频数从峰值向两侧都是单调下降的,也就是说按车头间距分组得到的车速这一随机变量基本上服从正态分布. 使用 Kolmogorov-Smirnov 检验与 Shapiro-Wilk 检验等,结果亦说明车速服从正态分布. 因此,就可以用每一个分组的平均值作为该组的代表性数值进行讨论. 表 2 给出了按车头间距分组计算的实测平均车速分布情况.

表 1 上海市延安高架路雪天“速度-车头间距”实测频数表

Table 1 Velocity-headway data frequency (measured on Yan'an viaduct of snowing day)

ρ	h_s/v	< 10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	≥ 60	Total
[0.675,1]	≤ 10.37	10	28	126	108	22	8	18	320
[0.525,0.675]	10.37~13.33	3	40	358	601	153	29	44	1 228
[0.425,0.525]	13.33~16.47	14	44	517	1 217	473	78	57	2 400
[0.325,0.425]	16.47~21.54	52	76	648	1 715	889	131	89	3 600
[0.225,0.325]	21.54~31.11	49	71	453	1 455	1 005	205	87	3 325
[0,0.225]	≥ 31.11	27	26	160	446	432	139	38	1 268
Total		155	285	2 262	5 542	2 974	590	333	12 141

注: h_s 为车头间距(单位 m), v 为车速(单位 km/h), ρ 为无量纲密度(特征密度 143 veh/km).

Note: h_s is headway (m), v is velocity (km/h), ρ is non-dimensional density (143 veh/km).

表 2 按车头间距分组计算的实测平均车速分布表

Table 2 Distribution of mean velocity categorized by headway

Video/Headway	< 10.4	10.4~13.3	13.3~16.5	16.5~21.5	21.5~31.1	≥ 31.1	Mean velocity	Mean density
rush hours in fine day	19.5	26.48	30.93	34.81	38.81	44.26	31.39	0.407 9
ordinary hours in fine day	38.07	43.88	45.39	47.88	49.42	50.73	47.82	0.304 7
snowing day	32.00	34.50	35.59	36.42	38.13	39.42	36.73	0.334 7

从表 2 可以看出, 在 3 个样本中, 随着车头间距的增大, 对应的平均车速也在增大, 这一特征刻画了交通流的基本性质: 路段上车辆越稀少, 交通服务水平越高, 则平均车速就越快。

但同时从表 2 也可以看出, 在不同的样本中, 平均车速随车头间距增大而增大的速率也是不同的. 在 高密度交通流中 (以车头间距小于 10.4m 为代表, 相当于密度为将近 96 veh/km 甚至更高), 考虑上海延安高架路段, 交通低谷时段的平均速度是高峰时段的 2 倍, 而到了低密度时 (以车头间距大于等于 31.1m 为代表, 相当于密度为将近 32 veh/km 甚至更低), 这个数字是 1.15 倍. 这其实就是交通流非线性特征的反映。

将上述 3 个样本的“车头间距-车速”数据按照密度大小等距分成 200 组, 同一密度范围中的数据再按照速度大小排序, 取连续 10 辆车的平均值换算成流量, 得到“流量-密度”关系如图 1~ 图 3 所示, 图 4 是 3 个样本合并起来的结果。

对于交通流的流量-密度关系, Kerner 曾经指出 [3-5], 实际测量的结果并非简单的曲线函数关系, 而应该是散布在流量-密度平面上的一个二维区域中的点 (图 5), 简化成低密度自由流阶段的一条曲线和中、高密度拥挤流阶段的一个二维区域, 在单车道条件下自由流曲线后部与二维区域最高端重合。换句话说, 对同一个密度状态, 有时车辆可以以自

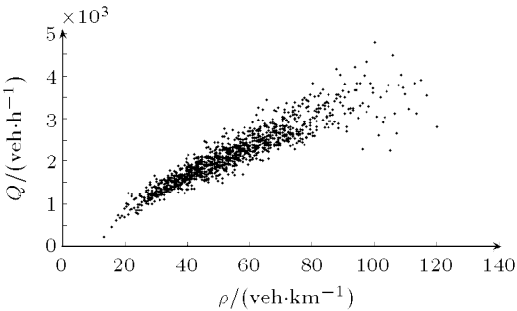


图 2 雪天样本“流量-密度”实测数据
Fig.2 Flow-density data of snowing day

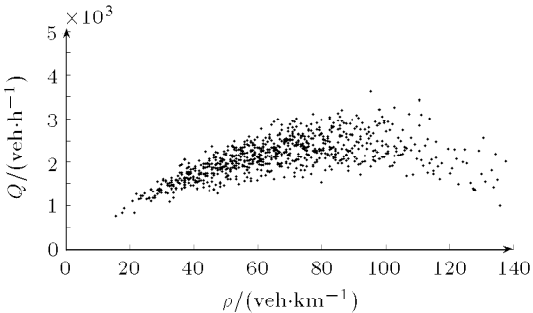


图 3 晴天高峰样本“流量-密度”实测数据
Fig.3 Flow-density data of rush hours in fine day

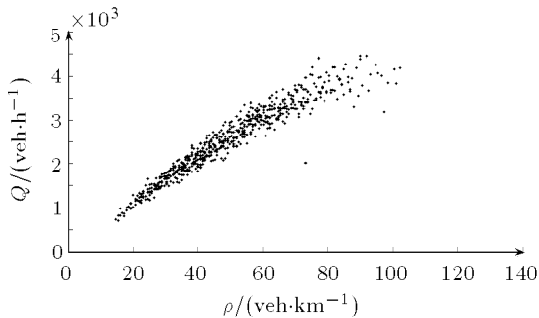


图 1 晴天低谷样本“流量-密度”实测数据
Fig.1 Flow-density data of ordinary hours in fine day

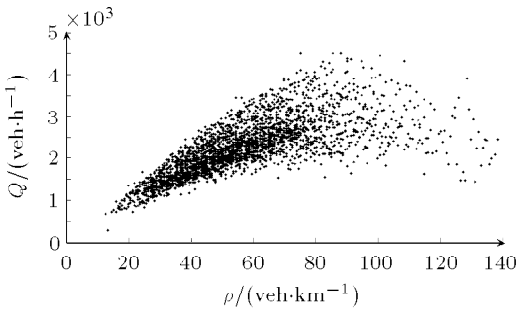


图 4 “流量-密度”实测数据汇总
Fig.4 Total flow-density data

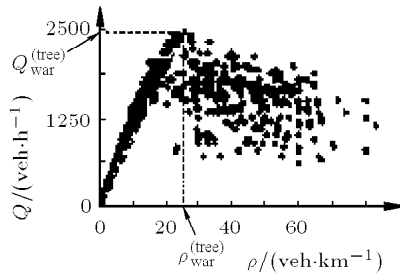


图 5 Kerner 的“流量-密度”数据

Fig.5 Kerner's flow-density data

由流的高速行驶,有时车辆只能以拥挤流的低速行驶。

图 1~图 4 说明,中国交通实际测量得到的流量-密度关系,也是散布在二维平面某个区域中的点,而不是一条简单的曲线。这与 Kerner 的发现本质上是一致的。不过,它们与图 5 对比又有一些细节上的差异,以下尝试从一些新的角度来分析流量-密度关系:

(1) 图 1~图 3 所代表数据的整体平均密度是递增的(这一点参照表 2)。在图 3 中没有流量在 4000 veh/h 以上的数据,而图 1 有 25 个数据点,图 2 有 8 个数据点,这些点出现的密度范围在 70~110 veh/km 之间。这说明在实测对象是车流中一辆辆车的瞬时速度和密度时,确实可以在高密度处发现高速的数据,但这些数据并不是出现在一条整体高密度的路段上的数据(图 3 中没有发现),而是在一条整体低密度高速度的路段上出现局部高密度时的数据(图 1~图 2 中发现)。这也与现实中可以观测到的现象相符:在低密度高速路段中,有时会出现一段高密度的车辆,其速度与路段其余车辆速度没有明显差别,但却明显高于一般处于该密度时应有的速度。

(2) 从图 1~图 3 可以看出,随着路段整体平均密度的递增, Kerner 指出的低密度自由流阶段的曲线特性越来越不明显,在图 3 中几乎观察不出。考察某个密度 ρ 的最大流量与最小流量的差值 $\Delta Q(\rho)$,可以发现在图 1~图 2 中数据点呈带状分布, $\Delta Q(\rho)$ 随 ρ 的增大而增大,而图 3 中 $\Delta Q(\rho)$ 随 ρ 的增大先递增后递减。

2 统计意义下的平衡函数

在宏观交通流微分方程模型中,右端的平衡函

数项有重要的意义,对扰动的传播发展起着明显的作用^[12],已有多篇文献提出各种平衡函数及论述其意义。本文不打算提出新的平衡函数形式,而是尝试通过实测数据对比研究已有的平衡函数,从中筛选出最优模型。

作者认为一个好的平衡函数将使得经由车头间距计算得到的平衡速度足够接近于真实测量速度的平均值,定义平均绝对误差如下

$$e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |v(h_i) - v_i| \quad (12)$$

其中, $v(h)$ 可以为平衡函数公式(4)~(11)中的任一个, $\{(h_i, v_i)\}_n$ 为实测数据按照车头间距进行的分组。对于式(4)~(11),在这里令其 $u_f = 88.5 \text{ km/h} = 24.58 \text{ m/s}$, $\rho_j = 143 \text{ veh/km}$ 。对上述 8 个平衡函数,对应于划分的每一个车头间距区间分别进行 e 值计算,可有以下分析。其中,雪天数据样本的比较结果如表 3 所示,其余两个样本类似,在此不一一列出。

从表 3 中可以发现,式(10)计算得到的 e 值在大部分区间都远大于其余公式的计算值(且很多情况远大于 1),说明 Kerner-Konhauser 平衡函数不适合用于计算这几个样本条件下的交通流参数,当然这并不排除它在其他交通问题,尤其是一些非线性理论分析问题中得到应用。表 3 的最后一列给出了在该车头间距区间的最优平衡函数模型,表 4 总结了 3 个样本的各种最优平衡函数出现的密度区间分布。从表 3 及其余两个样本的类似表格中可以看出,随着车头间距的增大(密度的减少),3 段数据的最优平衡函数的出现顺序基本相同,仅有一个例外,见表 4 中斜体数据(第 3 行第 6 列本应出现 LEE 函数的地方出现了 Payne 函数),这提供了一个建立分段平衡函数的依据。依据表 4 最后一行数据,可以发现 Greenberg, Wu ($n = 2.8$) 和 LEE 模型作为最优平衡函数模型所占的无量纲密度区间长度都小于 0.05,几乎可以忽略,而其余 4 个平衡函数所占的密度区间超过 0.9,因而以下提出的分段平衡函数按密度从小到大将主要由 Underwood, Wu ($n = 2.5$), Greenshields 和 Payne 函数组成。

依据本文所讨论的统计数据,可以把方程(2)改写成如下的形式,以其中一根车道为例

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{a^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{1}{Tr} [\bar{U}_e(\rho) - u] \quad (13)$$

表 3 按车头间距分段计算的平均绝对误差 (雪天)

Table 3 Mean absolute errors categorized by headway (snowing day)

Headway/Equation	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	Best model
(56, 93.33]	0.481 3	0.525 9	0.555 8	0.569 6	0.618 0	0.525 2	0.578 8	0.569 5	Underwood
(40, 56]	0.338 5	0.414 4	0.455 3	0.474 7	0.553 3	0.362 7	0.463 1	0.474 4	Underwood
(31.11, 40]	0.255 6	0.365 9	0.416 6	0.441 2	0.548 5	0.265 6	0.350 6	0.440 2	Underwood
(25.45, 31.11]	0.208 1	0.340 4	0.398 0	0.426 5	0.507 4	0.210 7	0.216 6	0.424 3	Underwood
(21.54, 25.45]	0.198 5	0.306 4	0.367 3	0.398 6	0.437 9	0.198 6	0.504 1	0.394 1	Underwood
(18.67, 21.54]	0.225 1	0.277 3	0.342 2	0.376 7	0.378 7	0.225 0	1.685 0	0.368 4	Greenberg
(16.47, 18.67]	0.287 5	0.232 8	0.299 4	0.338 4	0.307 4	0.287 5	4.470 9	0.323 4	$n = 2.5$
(14.74, 16.47]	0.413 4	0.205 0	0.256 1	0.294 5	0.246 5	0.415 5	10.859 5	0.272 3	$n = 2.5$
(13.33, 14.74]	0.568 9	0.182 8	0.213 0	0.248 2	0.200 9	0.579 8	25.351 5	0.219 1	$n = 2.5$
(12.17, 13.33]	0.742 3	0.218 3	0.206 9	0.229 8	0.202 6	0.774 9	56.877 5	0.207 1	Payne
(11.2, 12.17]	1.006 2	0.300 0	0.212 6	0.204 2	0.210 5	1.088 0	133.780 5	0.227 9	Greenshields
(10.37, 11.2]	1.280 9	0.448 3	0.303 4	0.257 1	0.268 3	1.457 7	308.831 2	0.369 1	Greenshields
(9.66, 10.37]	1.525 3	0.649 6	0.459 9	0.385 5	0.364 0	1.853 3	659.221 2	0.603 2	Payne
(9.03, 9.66]	1.879 1	0.981 4	0.713 8	0.587 3	0.453 3	2.528 5	1 576.815	1.020 8	Payne
(8.48, 9.03]	1.994 4	1.242 0	0.917 6	0.757 1	0.455 9	3.126 7	3 387.15	1.425 8	Payne
(8, 8.48]	2.340 5	1.915 3	1.470 5	1.248 2	0.667 4	4.524 7	8 046.255	2.387 0	Payne
(7.57, 8]	3.080 2	3.643 3	2.899 9	2.528 3	1.280 8	8.096 8	22 018.34	4.838 5	Payne
≤ 7.57	3.181 9	12.884	10.595 9	9.451 9	3.900 0	26.982 9	131 179.1	18.750 3	Underwood

表 4 三段数据的平衡函数最优“无量纲密度”区间分布

Table 4 Non-dimensional density distribution of seven equilibrium functions in three samples

Video/Equation	Underwood	Greenberg	Wu($n = 2.5$)	Wu($n = 2.8$)	LEE	Greenshield	Payne
rush hours in fine day	(0,0.325)	(0.325,0.375]	(0.375,0.624]	—	(0.624,0.674]	(0.674,0.724]	(0.724,1]
ordinary hours in fine day	(0,0.225)	—	(0.225,0.375]	(0.375,0.424]	(0.424,0.474]	(0.474,0.674]	(0.674,1]
snowing day	(0,0.325)	(0.325,0.375]	(0.375,0.525]	—	(0.525,0.573]	(0.573,0.674]	(0.674,1]
average density length	0.292	0.033	0.183	0.016	0.049	0.150	0.309

注：无量纲化特征密度为 143 veh/km. 第 3 行第 6 列斜体数据为 Payne 函数。
Note: Non-dimensional Density is 143 veh/km. The data of row 3, column 6 actually beng to function Payne.

$$\bar{U}_e(\rho) = \begin{cases} e^{-\frac{\rho_1}{\rho_m}\rho}, & 0 < \rho < \rho_1 \\ 1 - \rho^{0.75}, & \rho_1 < \rho < \rho_2 \\ 1 - \rho, & \rho_2 < \rho < \rho_3 \\ \min\{1, 1.94 - 6\rho + 8\rho^2 - 3.93\rho^3\}, & \\ \rho_3 < \rho < 1 \end{cases} \quad (14)$$

其中 $\bar{U}_e(\rho)$ 为无量纲化的分段平衡函数。
划分密度区间的参数 (ρ_1, ρ_2, ρ_3) 可以通过表 4 确定。通过表 4 可以发现，在晴天高峰、晴天低谷和雪天的数据中， (ρ_1, ρ_2, ρ_3) 的取值还有所不同。在具体的数值计算时，可以根据设置的初始条件 (比如初始路段的平均密度) 定位使用哪一段观测数据进行密度区间划分。
在进行宏观交通流模型理论分析和数值计算时，充分利用真实的交通数据信息得到的表 4 和

式 (14)，应能得到有意义的启发。

3 激进型驾驶者划分标准

在交通流的元胞自动机模型研究中，吴可非等 [19-20] 考虑到驾驶员具有不同的驾驶特点，提出了把在车流中行驶的车辆分为激进型车辆和谨慎型车辆两类，对不同特征的车辆用不同的元胞自动机模型描述的思想。因此就产生了一系列问题：在中国现实交通中，不同特征驾驶行为的定量标准应该如何确定？不同特征驾驶行为所占比例分别是多少？
作者曾经提出过一个简单的模型 [21]

$$k = \frac{v}{h_s} \times 1000 \quad (15)$$

其中，车速 v 的单位是 km/h，车头间距 h_s 的单位是 m，区分系数 k 的单位是 h^{-1} ，当 $k > 2300$ 时为激进型车辆，当 $k < 2300$ 时为谨慎型车辆。此标准的想

法是某车车速与其和前车的间距的比例 (以下简称速度间距比) 不应超过某一固定比值 (以下称阈值), 否则称其为激进驾驶行为. 按此标准应用于上述数据, 得出 33.1% 的激进型驾驶者的结果, 比例显得太大, 不够合理.

在以上论述的基础上, 一个简单的拓展是

$$k = \frac{v}{h} = f(h) \quad (16)$$

即速度间距比的阈值不是固定的, 而应该是车头间距的函数. 根据实测的数据, 可以简单地描绘出“速度间距比-车头间距”点, 通过观察这些点可以发现, 大部分数据聚集在一个具有明显轮廓的二维区域中, 在这二维区域边界之上的点就代表了激进型驾驶行为. 如何得到该区域的边界呢? 研究发现, 式 (4)~(11) 都提供了边界可能具有的函数形式.

利用表 3 中雪天样本数据, 通过赋式 (4)~(11) 中的特征值 u_f 和 h_j 以不同的数值, 检验它们与数据边界的拟合程度, 通过比较分析可以从中筛选出具有最优拟合程度的公式. 因为特征值可能的取值范围较大, 故式 (4)~(11) 已不是传统意义上的平衡函数, 而只是具有与平衡函数相同的表达形式而已. 计算后得到如图 6 所示的区域边界, 以及边界的函数表达形式. 上述组成区域边界的公式特征值见表 5.

对于本节讨论的激进型驾驶者划分标准函数 $f(h)$, 可以简单地认为是图 6 中由曲线围成的二维

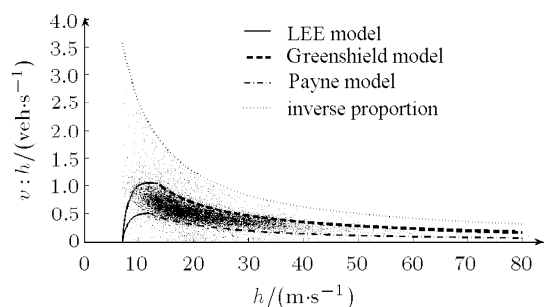


图 6 “速度间距比-车头间距”点及其边界 (雪天数据)

Fig.6 Relationship between velocity-headway ratio points and headway in snowing day

表 5 各边界公式的特征值

Table 5 Eigenvalues of four boundary formula

Characteristic value/model	LEE(up)	LEE(down)	Payne	Greenshields
$u_f/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	97.2	46.8	22.0	64.8
h_j/m	7	7	2.5	3.2

区域的上边界. 以此作为标准进行计算, 得到的激进型驾驶者比例 (雪天数据) 为 8.72%.

上述基于雪天数据对 $f(h)$ 和二维区域边界的分析方法, 同样适用于晴天高峰和晴天低谷两段数据. 在一个具体的数据样本中, 构成二维区域边界的函数形式不一定是 LEE, Payne 和 Greenshields 模型具有的形式, 应该对应于具体的数据对比分析式 (4)~(11), 从中筛选出边界最优拟合的函数形式.

4 结语与展望

(1) 本文通过大量实测数据重现流量-密度图, 与 Kerner 的流量-密度数据相比, 本文的数据更多, 覆盖的密度范围更大, 从中发现的一些现象符合中国真实交通状况. 作者认为: 在本文的数据测量基础上, 确实可以发现一些高密度高速度的实测数据, 并且符合现实中观察到的现象; 随着路段整体平均密度的递增, Kerner 指出的低密度自由流阶段的曲线特性越来越不明显.

(2) 通过计算实测速度与由各平衡函数模型导出的速度的平均绝对误差, 对比筛选出各密度区间内的最优平衡函数, 由此提出一种基于实测数据的分段平衡函数, 这样得到的交通流模型更加贴近中国的真实交通状况.

(3) 提出了一种激进型驾驶者的划分标准: 描绘出“速度间距比-车头间距”点可以发现, 大部分实测数据聚集在一个具有明显轮廓的二维区域中, 那么在这二维区域边界之上的点就代表了激进型驾驶行为. 采用与上面相同的方法从中筛选出边界最优拟合的激进型驾驶者划分标准函数, 从而计算得到激进型驾驶者比例, 并能作为参数引进到元胞自动机模型中.

随着实测数据的进一步增加, 表 4 能够扩充成更大的数据库, 在具体的数值计算之前, 对比数据库进行密度区间的划分参数的选择, 这样能够充分地利用观测数据信息为具体算例提供参数, 把以往纯粹的数值计算与现实数据联系起来. 作者曾经利用式 (1)~(3) 研究三车道交通流扰动的演化发展^[11], 一个很好的拓展就是用式 (13),(14) 代替式 (2),(3), 进一步研究多车道交通流的演化状况.

参 考 文 献

- 1 Kerner BS. Experimental features of the emergence of moving jams in free traffic flow. *J Phys A*, 2000, 33: 221-228

- 2 Kerner BS. Synchronized flow as a new traffic phase and related problems for traffic flow modeling. *Math and Comp Modeling*, 2002, 35: 481-508
- 3 Kerner BS. Experimental features of self-organization in traffic flow. *Phys Rev Lett*, 1998, 81: 3797-3800
- 4 Kerner BS, Konhauser P. Structure and parameters of clusters in traffic flow. *Phys Rev E*, 1994, 50: 54-83
- 5 Kerner BS, Rehborn H. Experimental features and characteristics of traffic jams. *Phys Rev E*, 1996, 53: 1297-1300
- 6 Helbing D, Huberman BA. Coherent moving states in highway traffic. *Nature*, 1998, 396: 738-740
- 7 Helbing D, Hennecke A, Treiber M. Phase diagram of traffic states in the presence of inhomogeneities. *Phys Rev Lett*, 1999, 82: 4260-4263
- 8 Helbing D, Treiber M. Jams, waves and clusters. *Science*, 2001, 282: 5396
- 9 Li Xingli, Kuang Hua, Song Tao, et al. New insights into traffic dynamics: a weighted probabilistic cellular automaton model. *Chin Phys B*, 2008, 17: 2366-2372
- 10 Payne HJ. FREFLO: A macroscopic simulation model of freeway traffic. *Transpn Res R*, 1979, 772: 68-75
- 11 朱辉, 吴正, 林展熙. 三车道宏观交通流模型和扰动演化的数值研究. *力学学报*, 2009, 41(1): 41-48 (Zhu Hui, Wu Zheng, Lin Zhanxi. A macro traffic flow model with three lanes and numerical study. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2009, 41(1): 41-48 (in Chinese))
- 12 吴正. 关于交通流中扰动传播和发展的数值模拟. *力学学报*, 2006, 38(5): 785-791 (Wu Zheng. On the numerical simulation of perturbations propagation and development in traffic flow. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2006, 38(5): 785-791 (in Chinese))
- 13 吴正. 低速混合型城市交通的流体力学模型. *力学学报*, 1994, 26(2): 149-157 (Wu Zheng. A fluid dynamics model for the low speed traffic systems. *Acta Mechanica Sinica*, 1994, 26(2): 149-157 (in Chinese))
- 14 Underwood RT. Speed, Volume and Density Relationships. *Quality and Theory of Traffic Flow*, New Haven, Connecticut, 1961. 141-188
- 15 Greenshields BD. A study in highway capacity. *Highway Res Board Proc*, 1934, 14: 448-477
- 16 Greenberg H. An analysis of traffic flow. *Ops Res*, 1959, 7: 79-85
- 17 Kerner BS, Konhauser P. Cluster effect in initially homogeneous traffic flow. *Phys Rev E*, 1993, 48: 2335-2338
- 18 Lee HY, Lee HW, Kim D. Origin of synchronized traffic flow on highways and its dynamic phase transitions. *Phys Rev Lett*, 1998, 81: 1130-1133
- 19 吴可非, 邝华, 孔令江等. 元胞自动机 FI 和 NS 交通流混合模型的研究. *广西师范大学学报*, 2005, 23(4): 8-12 (Wu Ke-fei, Kuang Hua, Kong Lingjiang, et al. Study of a cellular automaton FI and NS mixed model for traffic flow. *J of Guangxi Normal University*, 2005, 23(4): 8-12 (in Chinese))
- 20 吴可非, 孔令江, 刘慕仁. 双车道元胞自动机 NS 和 WWH 交通流混合模型的研究. *物理学报*, 2006, 55(12): 6275-6280 (Wu Kefei, Kong Lingjiang, Liu Muren. The study of a cellular automaton NS and WWH mixed model for traffic flow on a two-lane roadway. *Acta Physical Sinica*, 2006, 55(12): 6275-6280 (in Chinese))
- 21 吴正, 郭明旻, 郑贤清等. 基于高速道路录像资料的交通流实测研究. 见: 第 16 届海峡两岸都市交通学术研讨会论文集, 南京: 东南大学出版社, 2008. 616-621 (Wu Zheng, Guo Mingmin, Zheng Xianqing, et al. Study on the traffic flow measurement based on video recording of expressway. In: *Proc. of the 16th cross-strait traffic conference*, Southeast University Press, Nanjing, 2008. 616-621 (in Chinese))

(责任编辑: 刘俊丽)

A COMPARATIVE STUDY ON TRAFFIC FLOW MODELS BASED ON MEASURED DATA¹⁾

Lin Zhanxi Guo Mingmin Zheng Xianqing Wu Shengchun Wu Zheng²⁾

(Department of Mechanics and Engineering Science, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract Most of the papers that we can read about traffic flow models focus on interpreting traffic phenomenon. It is drawn in this paper that over 26 000 “car velocity-headway distance” data pairs are obtained from the long time video recordings of a section in Yanan Expressway of Shanghai with three traffic circumstances: peak hour; low traffic hour; snow day. Compared with Kerner’s flow-density traffic flow model, we can find that as the samples’ average density increases, the free flow’s curvilinear flow-density relation becomes weaker and there will be nonlinear characteristic. Some new interesting phenomena, such as “high velocity – small headway distance” data in the traffic flow that has low average density only, are found from the Fig.1~Fig.3 and are discussed in the paper.

Real measured data support and enlight the study of traffic flow models. On the aspect of macroscopical differential models, this paper propose a method to choose the best-fit function in each density section to form a piecewise function, which is much closer to present Shanghai traffic conditions. On the aspect of cellular automata models, this paper give a method to quantify the proportion of aggressive drivers, which is proposed by means of fitting different equilibrium functions to real measured data.

Key words traffic flow models, measured data, flow-density figure, piecewise equilibrium function, aggressive drivers

Received 10 March 2009, revised 27 April 2010.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (10772050).

2) E-mail: wuzheng@fudan.edu.cn