

大城市高架路实测数据分析与交通流模型研究¹⁾

吴 正²⁾ 郭明旻 郑贤清 林展熙 吴胜春 赵昀杰 张英莹

(复旦大学力学与工程科学系, 上海 200433)

摘要 对上海市中心延安高架路一个路段交通流进行长时间录像拍摄, 提取到“车速-车头间距”有效数据 26 000 余对. 应用该批实测数据, 对多种常见交通流速密关系模型进行比较研究后发现, 一维管流模型在我国高速公路交通流参数计算中具有优势. 提出采用变参数一维管流模型刻画交通流非线性特征的基本方法.

关键词 交通流模型, 实测数据, 一维管流模型, 交通状态指数, 非线性

中图分类号: O39, U491.112 **文献标识码:** A **文章编号:** 0459-1879(2010)04-0789-09

引 言

交通流模型研究已经有半个多世纪的历史, 并且每隔 20 年左右出现一个重要的里程碑. 20 世纪 50 年代, Lighthill 等^[1] 首创用流体力学方法研究交通问题, 建立了描述道路交通流的一阶连续介质模型, 论证了交通激波的存在, 这是第一个里程碑. 20 世纪 70 年代, Payne^[2] 提出交通流的二阶微分方程模型, 它具有与无黏可压缩流体运动方程组相似的特征, 根据 Payne 模型编写的 FREFLO 软件^[3] 在交通工程中得到一定的实际应用, 这是第二个里程碑. 20 世纪 90 年代, 是交通流模型研究蓬勃发展的时期, 重要理论成果有: Nagel 和 Schreckenberg^[4] 建立了高速公路元胞自动机交通流模型, 开辟了交通流微观模型新领域; Daganzo^[5] 指出了 Payne 模型存在“类气体行为”的缺陷, 导致非对称宏观模型的兴起; Kerner, Helbing 等^[6-13] 基于高速公路大量实测数据, 提出了非线性二维速密关系模型, 引领了复杂交通研究的前进方向. 按照笔者的观点, Kerner 等的理论具有最深刻的意义, 因而把它看作第三个里程碑.

我国的交通流模型研究起步于 20 世纪 90 年代初, 笔者发表了低速混合型城市交通流动力学模拟的第一批论文^[14-17]. 此后, 交通流模型研究得到国内一大批高校的多位知名学者关注, 发表了成千上万篇论文, 其中戴世强等^[18]、Jiang 等^[19-21]、Zhang^[22]、Xue 等^[23]、Lam 等^[24] 的文章产生了

重要的学术影响. 近年来, 我国研究者较多致力于利用各种元胞自动机模型, 揭示交通流的非线性现象及其数学性质^[25-30]; 在应用层面上, 多车道交通流和网络交通流模型受到一定重视^[24,31-37]; 还有一些研究者把研究对象从机动车流拓展到行人流、非机动车流等领域^[38-40].

从根本上说, 交通流模型研究的目的是为了较好地认识交通流这样一个强非线性的复杂过程, 运用适当的数学和信息化手段对其中各种现象进行实测和预报, 从而为交通规划、建设、管理和智能化控制等工程实践提供依据. 已有的数十成百种交通流模型为实现这一目标奠定了良好的基础, 不过这些模型背景不同, 国情相异, 建模思路和数学手段更是各有千秋, 交通工程界尚难直接加以应用. 建立适当的研究平台, 对各种模型进行比较研究, 明确它们不同的适用范围, 应该是当前交通流研究的一项重要任务. 我们曾用单车道交通流数值试验平台, 以不同拥挤程度车流中局部扰动的传播速度为主要指标, 对多种二阶连续交通流模型及其平衡函数和离散格式进行过系统性的比较研究, 筛选出了一组能够覆盖整个密度范围并具有合理计算结果的数值模型^[41]. 本文则进一步尝试建立基于大样本实际交通流测量数据的研究平台, 进行交通流模型比较研究, 希望得到对非线性复杂现象尽可能简明的数学表示方式.

1 与本文有关的交通流模型简述

本文讨论中均假定: 畅行速度 $u_f = 88.5 \text{ km/h}$

2009-02-19 收到第 1 稿, 2009-06-10 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

24.58 m/s, 堵塞密度 $\rho_j = 143 \text{ veh/km}$, 相应的最小车头间距 $h_j = 7 \text{ m}$. 为了便于和实测数据进行比较运算, 原来用“速度-密度”关系 $v(\rho)$ 表示的交通流模型, 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.

1.1 交通工程界早期根据实测数据回归的速密关系模型

最常用的速密关系是 Greenshields 模型 [42], 它表示速度随着密度增加而线性下降, 这一简单模型至今在交通工程中仍有广泛的应用. 采用本节开始的假定, Greenshields 模型可为

$$v = 24.58 \times (1 - 7/h) \tag{1}$$

Greenshields 模型不能适用于密度很高的情况, 改用 Greenberg 模型 [43] 则结果较好

$$v = 9.045 \times \ln(h/7), \quad h < 19.026 \tag{2}$$

对于密度很低的情况, 则又可以改用 Underwood 模型 [44]

$$v = 24.58 \times \exp(-19.026/h), \quad h > 19.026 \tag{3}$$

1.2 二阶微分方程模型中的平衡函数

Payne 提出的二阶微分方程模型为 [2]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) = 0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{a^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{1}{T_r}(U_e - u) \tag{5}$$

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, T_r 为反应时间, a 为等效音速. 根据 Payne 的概念, 平衡速度即某一密度状态下交通流应该趋于的一个均衡状态, 所以它本质上也是一种速密关系函数. 采用本节开始的假定, Payne 通过实测得到的平衡函数可为

$$v = 24.58 \times \min(1, 1.94 - 42/h + 392/h^2 - 1348/h^3) \tag{6}$$

由于方程 (5) 右端的平衡函数项对刻画非线性现象有明显的作, 近年来有人提出另外一些平衡函数表达式, 如 Kerner-Konhauser 平衡函数 [6]

$$v = 24.58 \times \{1/[1+\exp(700/6h-25/6)]-0.000\ 003\ 72\} \tag{7}$$

Lee 平衡函数 [45]

$$v = 24.58 \times (1 - 7/h)/(1 + 2401/h^4) \tag{8}$$

1.3 一维管流模型

笔者曾针对我国城市交通低速、混合的特征, 通过把交通流比拟为管道内的一维气流而提出了另外一种宏观交通流二阶微分方程模型 [16]

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{c^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} &= -\frac{\tau_w}{\rho A} \end{aligned} \right\} \tag{9}$$

其中 $c = \frac{m-1}{2} \rho^{\frac{m-1}{2}}$, τ_w 为车流“摩擦阻力”, A 为路段宽或车道数, m 为交通状态指数 ($1 < m \leq 3$). 已经证明 [14]: 当 $m = 3$ 时, 此模型即为 Greenshields 模型; 当 $m \rightarrow 1$ 时, 它又趋向于 Greenberg 模型. 至于一般的 m 值, 则与下面的速密关系函数等价

$$v = 24.58 \times [1 - (7/h)^{\frac{m-1}{2}}] \tag{10}$$

数值模拟中建议取 $m = 2.8$ 左右 [16], 即有

$$v = 24.58 \times [1 - (7/h)^{0.9}] \tag{11}$$

通过数值模拟 [46] 和实际测量 [47] 两方面研究又发现, 一维管流模型也能够应用到高速道路交通系统, 此时交通状态指数取值应在 $m = 2.5$ 左右, 所以又有

$$v = 24.58 \times [1 - (7/h)^{0.75}] \tag{12}$$

1.4 Kerner 的二维速密关系模型

上面列出的各种交通流速密关系函数, 或者等价的流量-密度关系函数, 都可以用一条曲线表示. 但 Kerner 指出 [6-9], 实际测量的结果并非如此, 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 1), 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 (图 2), 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, 有时车辆可以自由流的高速行驶, 有时车辆只能以拥挤流的低速行驶.

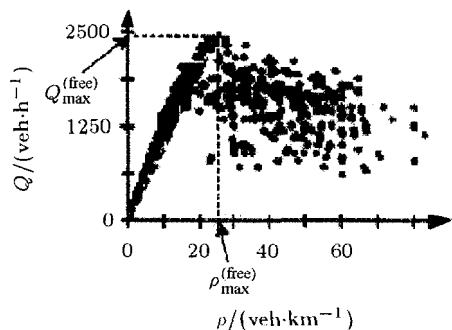


图 1 流量-密度实测数据

Fig.1 Measurement data of flow-density

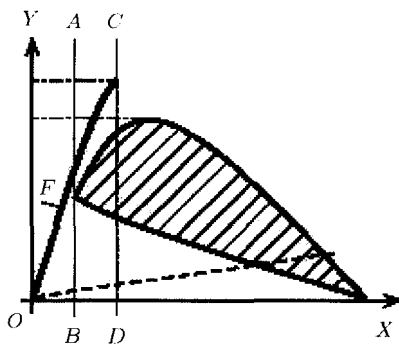


图 2 多车道流量-密度模型

Fig.2 Multi-lane model of flow-density

2 交通流实测中的一些发现

本文采用基于高速道路交通录像资料的交通流模型参数测量方法^[48]，直接测量对象为交通流中各车辆通过某一位置时的“车速-车头间距”数据对。具体做法是：以上海市中心延安高架路陕西路西侧西向东方向 100 多米的路段（上海展览馆门口，图 3）为对象，通过在其南侧居民楼 12 层高处架设摄像机，进行长时间的连续拍摄，取得该路段交通流详细资料，并通过视频播放软件将所拍摄的录像转换成逐帧排列的图形文件。采集数据时，首先任意选定一帧图形，用自行开发的图像辨识软件或加上必要的人工干预手段，

确定行驶于同一车道上的相邻两辆车的车头位置，计算出两者之间的车头间距。然后，根据事先设定的时间间隔（本文中为 0.8s），取出下一帧图形，确定这两辆车中后一辆此时的车头位置，即可知该车移动的距离。由于距离除以时间就是该车的速度，这样便得到了一组“速度-车头间距”数据对，重复上述过程可以按照一定时间间隔提取大量“车速-车头间距”数据对。从 2008 年 1 月至 9 月，先后对该路段进行了 9 次总共 42h 的实际拍摄，从中提取到“车速-车头间距”有效数据 26 000 余对。该路段基本没有坡度和弯曲，并且进出口匝道与我们的数据提取位置距离都在 300m 以上，具有典型平直路段特征。在拍摄中，包括上下班高峰时段、普通时段和雪天，提取的数据也分为这 3 个不同样本。雪天部分数据连续拍摄 7h，提取结果发现高峰时段与普通时段变化不明显，所以样本没有分开。

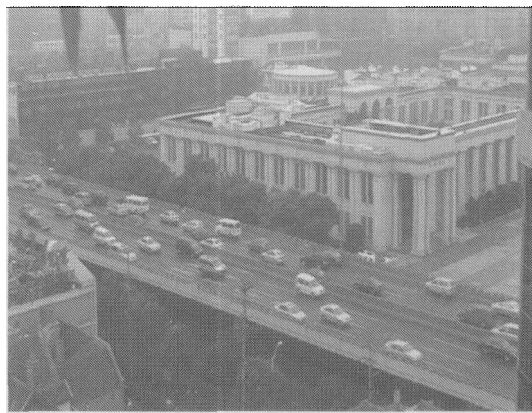


图 3 上海延安高架路观测点示意图

Fig.3 Measuring site of Yanan expressway of Shanghai

表 1 列出了实测得到的按不同车道分组的平均车速数据，其中车道 1 靠近双向隔离栏，为超车道，车道 2, 3, 4 依次向右排列。通过表 1 看到：3 个样本中，车道 1 的平均车速都是最大，车道 2, 3, 4 依次递减，和交通流的实际情况相吻合。

表 1 不同车道的实测平均车速

Table 1 Measuring averaged velocity of vehicles in different lanes

Lane	Number of samples in peak hour	Averaged velocity/($m \cdot s^{-1}$)	Number of samples in low traffic hour	Averaged velocity/($m \cdot s^{-1}$)	Number of samples in snow day	Averaged velocity/($m \cdot s^{-1}$)
1	2475	9.91	1794	14.28	3404	11.03
2	2060	9.28	1175	13.64	3010	10.30
3	2101	7.66	2054	12.73	3498	9.72
4	1202	7.16	1025	12.24	2229	9.56
sum	7838	8.72	6048	13.28	12141	10.20

表 2 列出了按不同车头间距范围分组 (等价于按不同密度范围分组) 计算的平均车速数据, 图 4 是相应的“平均速度-密度”关系曲线. 通过表 2 可以看到: 平均车速的最大值都出现在车头间距大于 30 m (无量纲密度小于 0.2) 的组里, 随着车头间距减小 (密度增大), 平均车速呈相应减小的趋势, 3 个样本无一例外. 平均车速的这些变化规律与交通流

的实际经验相吻合, 它至少可以在宏观平均意义上说明本文实测方法所获结论是合理的. 因此, 本文进一步尝试建立基于该大样本实际交通流测量数据的研究平台, 进行交通流模型的比较研究.

把某一样本总共 N 次实测中得到的“车速-车头间距”数据对记为 v_i^m 和 h_i^m ($i = 1, 2, \dots, N$), 将 h_i^m 代入上一节所列各种速密关系计算公式又可得

表 2 不同车头间距范围的实测平均车速

Table 2 Measuring averaged velocity of vehicles in different headway ranges

Headway / m	Normalized density	Number of samples in peak hour	Averaged velocity / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Number of samples in low traffic hour	Averaged velocity / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Number of samples in snow day	Averaged velocity / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
> 56.00	< 0.125	17	12.62	87	13.94	32	9.29
40.00 ~ 56.00	0.125 ~ 0.175	92	13.40	310	14.35	258	10.98
31.11 ~ 40.00	0.175 ~ 0.225	271	11.91	619	13.98	978	10.99
25.45 ~ 31.11	0.225 ~ 0.275	512	11.28	792	13.93	1459	10.64
21.54 ~ 25.45	0.275 ~ 0.325	674	10.42	942	13.58	1866	10.55
18.67 ~ 21.54	0.325 ~ 0.375	886	9.96	813	13.27	1922	10.21
16.47 ~ 18.67	0.375 ~ 0.425	913	9.40	768	13.31	1678	10.01
14.74 ~ 16.47	0.425 ~ 0.475	937	8.82	607	12.67	1369	9.97
13.33 ~ 14.74	0.475 ~ 0.525	867	8.33	429	12.53	1031	9.81
12.17 ~ 13.33	0.525 ~ 0.575	738	7.77	322	12.40	636	9.56
11.20 ~ 12.17	0.575 ~ 0.625	633	7.28	152	11.92	376	9.68
10.37 ~ 11.20	0.625 ~ 0.675	429	6.82	99	11.97	216	9.60
9.66 ~ 10.37	0.675 ~ 0.725	332	6.30	50	10.85	131	9.19
9.03 ~ 9.66	0.725 ~ 0.775	185	5.90	23	11.39	80	9.08
8.48 ~ 9.03	0.775 ~ 0.825	148	4.94	15	11.38	49	8.26
8.00 ~ 8.48	0.825 ~ 0.875	78	4.43	8	9.44	26	8.07
7.57 ~ 8.00	0.875 ~ 0.925	72	3.79	5	8.22	13	8.73
≤ 7.57	≥ 0.925	54	3.22	7	7.19	21	7.55
sum		7838	8.72	6048	13.28	12141	10.20

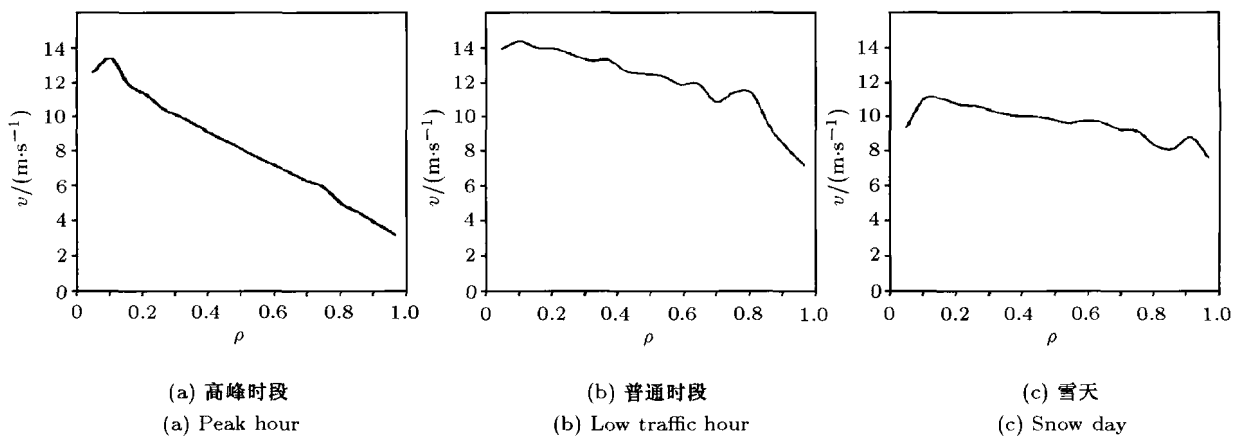


图 4 “平均速度-密度”关系曲线

Fig.4 Averaged velocity-density relationship

到对应的 $v_i (i = 1, 2, \dots, N)$. 定义平均误差

$$e_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{v_i^m}{v_i} - 1 \right) \quad (13)$$

和平均绝对值误差

$$e_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{v_i^m}{v_i} - 1 \right| \quad (14)$$

利用 3 个样本的数据, 分别按式 (1)~(3), (6)~(8), (11) 和式 (12) 计算各模型的 e_1 和 e_2 值, 结果如表 3 所示.

从表 3 中发现:

表 3 不同速密关系计算的误差比较

Table 3 Comparison of calculation errors of different velocity-density models

Velocity-density model	Eq.(1)	Eq.(2)	Eq.(3)	Eq.(6)	Eq.(7)	Eq.(8)	Eq.(11)	Eq.(12)
e_1 in peak hour	-0.24	0.51	0.26	-0.29	$\gg 1$	-0.11	-0.18	-0.06
e_2 in peak hour	0.42	0.66	0.43	0.36	$\gg 1$	0.49	0.40	0.38
e_1 in low traffic hour	-0.11	0.56	0.49	-0.13	$\gg 1$	-0.05	-0.05	0.07
e_2 in low traffic hour	0.24	0.62	0.55	0.28	$\gg 1$	0.28	0.23	0.25
e_1 in snow day	-0.28	0.29	0.22	-0.30	$\gg 1$	-0.23	-0.23	-0.13
e_2 in snow day	0.38	0.47	0.40	0.37	$\gg 1$	0.40	0.35	0.32

(2) 比较 e_2 的大小, 以及 e_1 绝对值的大小, 可以找出在宏观平均意义上相对实测数据误差最小的速密关系计算公式. 它们是: 高峰时段中的 Payne 平衡函数 (e_2) 和 $m = 2.5$ 时的一维管流模型 (e_1); 普通时段中的一维管流模型 ($m = 2.8$); 雪天中的一维管流模型 ($m = 2.5$).

(3) 注意到在高峰时段 e_2 的计算结果中, $m = 2.5$ 时的一维管流模型仅次于 Payne 平衡函数, 为次最小值. 因此, 根据我国城市交通特点而建立的一维管流模型, 应用在今天我国高速道路交通流参数计算时, 至少具有宏观平均意义上的明显优势. 这一模型中的交通状态指数 m 可以根据不同交通条件而调整: 在高峰时段和雪天, 即道路拥挤、车速很低的条件下, 取 $m = 2.5$ 较好; 在普通时段, 即道路畅通、车速较高的条件下, 则取 $m = 2.8$ 更好.

(4) 式 (7) 计算得到的 e_1 和 e_2 在 3 个样本中均远大于 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.

3 用一维管流模型表达的交通流非线性特征

将作者的“车速 - 车头间距”实测结果转换成

(1) 式 (1), (6), (8) 和式 (11) 得到的 e_1 在 3 个样本中均为负值, 而式 (2) 和式 (3) 得到的均为正值. 这说明, 按照 Greenshields 模型、Payne 平衡函数、Lee 平衡函数或 $m = 2.8$ 时的一维管流模型计算的速度值, 在宏观平均意义上均大于同样密度条件下的实测值; 而 Greenberg 模型和 Underwood 模型的计算结果, 则在宏观平均意义上小于同样密度条件下的实测值. $m = 2.5$ 时的一维管流模型计算结果, 在高峰时段和雪天, 即道路拥挤、车速很低的条件下, 大于实测值; 而在普通时段, 即道路畅通、车速较高的条件下, 小于实测值.

“流量 - 密度”数据对, 则形态上与 Kerner 提出的二维区域交通流模型思想 (图 2) 是完全一致的^[48]. 需要指出的是: 他们把流量作为直接测量对象, 比较方便, 但每个数据需要一个较长的时间间隔, 也就是说这样得到的实测结果必然包含着时间上的平均效应; 而在“车速 - 车头间距”的实测中, 把计算速度所需的时间间隔规定为 0.8s, 因而得到的实测结果可以看作没有时间平均的即时数据, 更加贴近于交通流模型的本来定义. 由于这样两种测量方法的区别, 加上测量对象也存在很大差别, 所以从定量上看结果也会有差别. 作者曾用不同密度下流量的方差作为基本指标计算非线性范围和宽运动堵塞的传播速度^[48], 但这种方法不能达到类似于各种交通流速密关系函数那样比较简明、清晰的数学表示效果.

上一节已经指出, 一维管流模型在交通流参数计算中具有优势, 并且模型中的交通状态指数可以根据不同交通条件而调整. 在同一密度下, 改变 m 取值, 得到的速度和流量就有不同. 因此, 接下去就尝试用变参数一维管流模型 (10) 来刻画交通流的二维非线性区域. 将式 (10) 改写为

$$m = 1 + 2 \ln \left(1 - \frac{v}{24.58} \right) / [\ln(7/h)] \quad (15)$$

首先利用实测数据计算二维非线性区域上下边界处的 m 值随密度变化规律, 其中上边界为速度、流量最大处, 下边界为速度、流量最小处. 考虑到实测数据的偶然性, 将某一车头间距范围里全部数据按车速大小排列, 取其中车速最大 15% 的数据代入

式 (15) 计算 m 的平均值, 以此作为该密度相应的上边界处 m 值, 记为 μ ; 同样, 取车速最小 15% 的数据代入式 (15) 计算 m 的平均值, 以此作为该密度相应的下边界处 m 值, 记为 μ_d . 计算结果如表 4 和图 5 所示.

表 4 交通状态指数上、下边界及其差值

Table 4 Up boundary and down boundary of traffic behavior parameter and their difference

Headway/m	Peak hour			Low traffic hour			Snow day		
	μ	μ_d	$\mu - \mu_d$	μ	μ_d	$\mu - \mu_d$	μ	μ_d	$\mu - \mu_d$
> 56.00	2.25	1.29	0.96	2.16	1.43	0.73	1.84	1.13	0.71
31.11 ~ 56.00	2.34	1.45	0.88	2.47	1.65	0.82	2.16	1.36	0.80
21.54 ~ 31.11	2.55	1.46	1.09	2.74	1.83	0.90	2.32	1.47	0.85
16.47 ~ 21.54	2.62	1.49	1.14	2.90	2.00	0.89	2.56	1.57	0.99
13.33 ~ 16.47	2.73	1.54	1.19	2.93	2.12	0.82	2.78	1.78	1.01
11.20 ~ 13.33	2.81	1.58	1.23	2.96	1.96	1.00	2.90	1.93	0.97
9.66 ~ 11.20	2.83	1.60	1.23	2.92	1.37	1.55	2.94	1.94	1.00
8.48 ~ 9.66	2.84	1.41	1.43				2.93	1.12	1.82
7.57 ~ 8.48	2.79	1.49	1.30						
≤ 7.57	2.95	1.28	1.67						

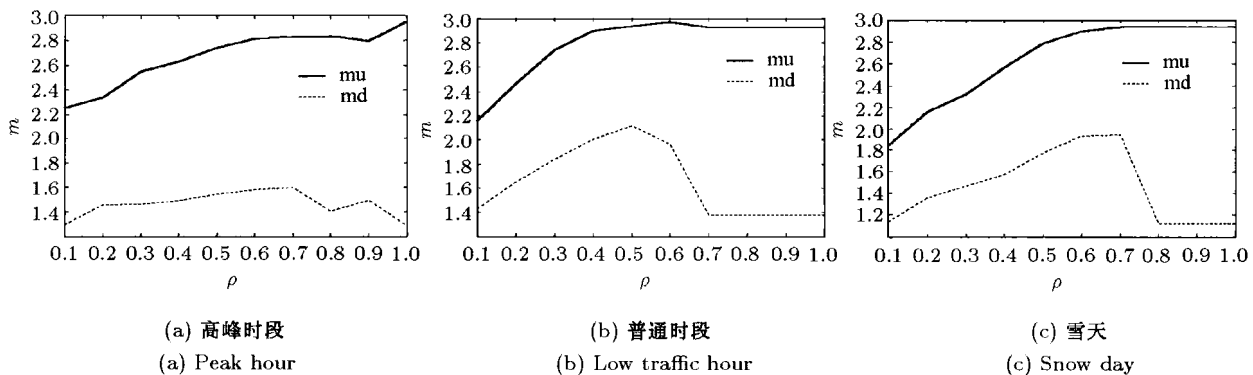


图 5 交通状态指数取值范围

Fig.5 Range of traffic behavior parameter

需要说明: 实测数据代入式 (15) 计算 m 时有少量结果为 $m > 3$, 该部分数据大多出现在车头间距小于 10m 的高密度情况下, 不属于非线性交通流研究关注的主要部分, 故表 4 中已将这部分数据剔除, 导致普通时段和雪天高密度情况下的几组数据因样本偏小而空缺. 在图 5 中, 这部分高密度范围以直线补满, 表示此时交通状态指数的变化范围与最后一组数据相差不大.

从表 4 中可以看到, μ 与 μ_d 的差值随着车头间距减小 (密度增大) 而增大, 在车头间距为 30m (无量纲密度 0.2) 前后有较显著的不同. 这一差值反映的就是一定密度下速度或流量的离散程度, 它增大到一定程度则线性模型表征的自由流无法刻画, 需

要转变为二维模型刻画的非线性复杂流动阶段. 在非线形阶段, 如果用接近 μ 的状态指数值, 则一维管流模型能够模拟接近畅通的交通状态; 如果用接近 μ_d 的状态指数值, 则它能模拟趋向拥堵的交通状态; 如果采用二者之间即时变化的状态指数值, 则有可能模拟交通流的相变等非线性特征.

4 结论与展望

(1) 本文提出了建立基于大样本实际交通流测量数据的研究平台, 进行交通流模型比较研究的思想.

(2) 采用基于高速公路交通录像资料的测量方法, 对上海市中心延安高架路的一个路段进行长时间的连续拍摄, 提取到包括上下班高峰时段、普通

时段和雪天 3 个不同样本的“车速-车头间距”有效数据 26 000 余对。统计显示,按不同车道或不同车头间距范围分组的平均车速实测数据均与交通流的实际经验很好吻合。

(3) 应用上述实测数据建立研究平台,对包括 Greenshields 模型、Greenberg 模型、Underwood 模型、Payne 平衡函数、Kerner-Konhauser 平衡函数、Lee 平衡函数和一维管流模型在内的多种交通流速密关系模型进行了比较研究。结果发现,应用一维管流模型进行我国高速道路交通流参数计算,具有比较明显的优势。在道路拥挤、车速很低和道路畅通、车速较高的两种不同条件下,该模型中的交通状态指数分别取值 $m = 2.5$ 和 $m = 2.8$ 左右。

(4) 采用变参数一维管流模型,通过计算随密度变化的交通状态指数最大值与最小值之差,能够刻画交通流的二维非线性特征。

在本文工作的基础上,将采用其他城市、非平直路段、非四车道等不同条件下的实测数据,建立更丰富的交通流比较研究平台,对各种交通流速密关系进行更深入的比较研究,以期获得更加全面、准确的结论。同时,采用数值试验方法,进一步研究用一维管流模型模拟交通流非线性阶段各种特征的可行性。

参 考 文 献

- Lighthill MH, Whitham GB. On kinematic waves II: A theory of traffic flow on long crowded roads. *Proc Royal Soc A*, 1955, 229: 317-345
- Payne HJ. Model of freeway traffic and control. *Math Methods of Public Systems*, 1971, 1: 51-61
- Payne HJ. FREFLO: A macroscopic simulation model of freeway traffic. *Transpn Res R*, 1979, 772: 68-75
- Nagel K, Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic. *J Phys I France*, 1992, 2: 2221-2229
- Daganzo CF. Requiem for second-order approximations of traffic flow. *Transpn Res B*, 1995, 29: 277-286
- Kerner BS, Konhauser P. Cluster effect in initially homogeneous traffic flow. *Phys Rev E*, 1993, 48: 2335-2338
- Kerner BS, Konhauser P. Structure and parameters of clusters in traffic flow. *Phys Rev E*, 1994, 50: 54-83
- Kerner BS, Rehborn H. Experimental features and characteristics of traffic jams. *Phys Rev E*, 1996, 53: 1297-1300
- Kerner BS. Experimental features of self-organization in traffic flow. *Phys Rev Lett*, 1998, 81: 3797-3800
- Helbing D, Huberman BA. Coherent moving states in highway traffic. *Nature*, 1998, 396: 738-740
- Helbing D, Hennecke A, Treiber M. Phase diagram of traffic states in the presence of inhomogeneities. *Phys Rev Lett*, 1999, 82: 4260-4263
- Kerner BS. Experimental features of the emergence of moving jams in free traffic flow. *J Phys A*, 2000, 33: 221-228
- Helbing D, Treiber M. Jams, waves and clusters. *Science*, 2001, 282: 5396
- 吴正. 交通流的动力学模拟与测量方法研究. 复旦学报(自然科学版), 1991, 30: 111-117 (Wu Zheng. Traffic flow dynamic modeling. *J of Fudan Univ NS*, 1991, 30: 111-117 (in Chinese))
- 吴正等. 关于交通流动力学模拟的测量研究与分析. 复旦学报(自然科学版), 1991, 30: 224-230 (Wu Zheng, et al. Measurement and analysis for dynamic modeling of traffic flow. *J of Fudan Univ NS*, 1991, 30: 224-230 (in Chinese))
- 吴正. 低速混合型城市交通的流体力学模型. 力学学报, 1994, 26: 149-157 (Wu Zheng. A fluid dynamics model for the low speed traffic systems. *Acta Mech Sinica*, 1994, 26: 149-157 (in Chinese))
- Wu Z, Zeng LN. Numerical model for dynamics simulation of traffic flow. *J Hydrodynamics B*, 1994, 6: 1-11
- 戴世强, 冯苏苇, 顾国庆. 交通流动力学: 它的内容、方法和意义. 自然杂志, 1997, 19: 196-201 (Dai Shiqiang, Feng Suwei, Gu Guoqing. Dynamics of traffic flow: its content, methodology and intent. *Chinese J of Nature*, 1997, 19: 196-201 (in Chinese))
- Jiang R, Wu QS, Zhu ZJ. A new continuum model for traffic flow and numerical tests. *Transpn Res B*, 2002, 36: 405-419
- Jiang R, Wu QS, Wang BH. Cellular automata model simulating complex spatiotemporal structure of wide jams. *Phys Rev E*, 2003, 68: 016117
- Jiang R, Wu QS. Cellular automata models for synchronized traffic flow. *J Phys A*, 2003, 36: 381-390
- Zhang HM. A nonequilibrium traffic model devoid of gas-like behavior. *Transpn Res B*, 2002, 36: 275-290
- Xue Y, Dai SQ. Continuum traffic model with the consideration of two delay time scales. *Phys Rev E*, 2003, 68: 066123
- Lam WHK, Li ZC, Huang HJ, et al. Modeling time-dependent travel choice problems in road networks with multiple parking facilities. *Transpn Res B*, 2006, 40: 368-395
- Li XL, Kuang H, Song T, et al. New insights into traffic dynamics: a weighted probabilistic cellular automaton model. *Chinese Phys*, 2008, 17: 2366-07
- Li XL, Song T, Kuang H, et al. Phase transition on speed limit traffic with slope. *Chinese Phys*, 2008, 17: 3014-07
- Shen B, Gao ZY. Phase transition in evolution of traffic with scale-free property. *Chinese Phys*, 2008, 17: 3284-05
- 唐铁桥, 黄海军, 徐刚等. 考虑信号灯影响的交通流模型与数值模拟. 物理学报, 2008, 57: 0056-05 (Tang Tieqiao, Huang Haijun, Xu Gang, et al. A traffic flow model considering signal light influence and its numerical simulation. *Acta Phys Sinica*, 2008, 57: 0056-05 (in Chinese))
- 梅超群, 黄海军, 唐铁桥. 高速公路入匝控制的一个元胞自动机模型. 物理学报, 2008, 57: 4786-08 (Mei Chaoqun, Huang Haijun, Tang Tieqiao. A cellular automaton model for study-

- ing the on-ramp control of highway. *Acta Phys Sinica*, 2008, 57: 4786-08 (in Chinese))
- 30 田丽君, 刘天亮, 黄海军. 含重叠路段交通系统中信息反馈策略的比较研究. *物理学报*, 2008, 57: 2122-08 (Tian Lijun, Liu Tianliang, Huang Haijun. Comparative studies on information feedback strategies in traffic networks with overlapping routes. *Acta Phys Sinica*, 2008, 57: 2122-08 (in Chinese))
- 31 唐铁桥, 黄海军. 两车道交通流的波动分析. *北京航空航天大学学报*, 2005, 31: 1121-1124 (Tang Tieqiao, Huang Haijun. Wave properties of a traffic flow model for freeways with two lanes. *J of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, 31: 1121-1124 (in Chinese))
- 32 Huang HJ, Tang TQ, Gao ZY. Continuum modeling for two-lane traffic flow. *Acta Mech Sinica*, 2006, 22: 132-137
- 33 Tang TQ, Huang HJ, Wong SC, et al. Lane changing analysis for two-lane traffic flow. *Acta Mech Sinica*, 2007, 23: 49-54
- 34 吴大艳, 谭惠丽, 孔令江等. 三车道元胞自动机交通流模型研究. *系统工程学报*, 2005, 20: 393-397 (Wu Dayan, Tan Huili, Kong Lingjiang, et al. Study on a three-lane cellular automata traffic flow model. *J of Systems Engineering*, 2005, 20: 393-397 (in Chinese))
- 35 王永明, 周磊山, 吕永波. 基于元胞自动机交通流模型的车辆换道规则. *中国公路学报*, 2008, 21: 0089-05 (Wang Yongming, Zhou Leishan, Lü Yongbo. Lane changing rules based on cellular automata traffic flow model. *China J of Highway and Transport*, 2008, 21: 0089-05 (in Chinese))
- 36 朱辉, 吴正. 基于实测的三车道交通流扰动波数值模拟研究. *水动力学研究与进展 A*, 2008, 23: 301-308 (Zhu Hui, Wu Zheng. Numerical simulation on three lanes traffic flow disturbance wave based on observation. *J Hydrodynamics A*, 2008, 23: 301-308 (in Chinese))
- 37 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))
- 38 Yu WJ, Chen R, Dong LY, et al. Centrifugal force model for pedestrian dynamics. *Phys Rev E*, 2005, 72: 026112
- 39 李新刚, 高自友, 赵小梅等. 混合非机动车流的多值元胞机模型模拟研究. *物理学报*, 2008, 57: 4777-09 (Li Xingang, Gao Ziyou, Zhao Xiaomei, et al. Multi-value cellular automata model for mixed non-motorized traffic flow. *Acta Phys Sinica*, 2008, 57: 4777-09 (in Chinese))
- 40 岳昊, 邵春福, 陈晓明等. 基于元胞自动机的对向行人交通流仿真研究. *物理学报*, 2008, 57: 6901-08 (Yue Hao, Shao Chunfu, Chen Xiaoming, et al. Simulation of bi-directional pedestrian flow based on cellular automata model. *Acta Phys Sinica*, 2008, 57: 6901-08 (in Chinese))
- 41 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: 785-791 (Wu Z. On the numerical simulation of perturbations propagation and development in traffic flow. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2006, 38: 785-791 (in Chinese))
- 42 Greenshields BD. A study of highway capacity. *Highway Res Board Proc*, 1934, 14: 448-477
- 43 Greenberg H. An analysis of traffic flow. *Ops Res*, 1959, 7: 79-85
- 44 Underwood RT. Speed, volume and density relationships. In: *Quality and Theory of Traffic Flow*. New Haven, Connecticut, 1961. 141-188
- 45 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
- 46 汪茂林, 吴正. 高速公路交通事故和干涉车流波的数值模拟. *水动力学研究与进展 A*, 2001, 16: 265-273 (Wang Maolin, Wu Zheng. On the numerical simulation for expressway incident and intervention traffic-flow wave. *J Hydrodynamics A*, 2001, 16: 265-273 (in Chinese))
- 47 吴正. 关于交通流动力学模型与交通状态指数研究. *水动力学研究与进展 A*, 2003, 18: 403-407 (Wu Zheng. Study on the traffic flow dynamics modeling and traffic behavior parameter. *J Hydrodynamics A*, 2003, 18: 403-407 (in Chinese))
- 48 吴正, 朱辉, 贾楠. 基于快速路交通录像的交通流模型参数测量方法研究. *复旦学报 (自然科学版)*, 2008, 47: 147-152 (Wu Zheng, Zhu Hui, Jia Nan. Measuring method study of the traffic flow model parameters based on video recording of expressway traffic. *J of Fudan Univ NS*, 2008, 47: 147-152 (in Chinese))

(责任编辑: 刘俊丽)

MEASURED DATA ANALYSIS OF URBAN EXPRESSWAY AND RESEARCH ON TRAFFIC FLOW MODELS¹⁾

Wu Zheng²⁾ Guo Mingmin Zheng Xianqing Lin Zhanxi Wu Shengchun Zhao Yunjie Zhang Yingying
(Department of Mechanics and Engineering Science, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract Traffic flow models are important to describe various complex traffic procedures on highway or road network and to establish intelligence traffic systems (ITS). Lots of improvement has been made in traditional traffic flow models, and many new traffic flow theories have been developed.

Generally the formation of a traffic flow model requires massive observation as well as in-depth analysis of real road traffic. Empirical data are indispensable to identifying parameters when the corresponding model is utilized. One of the basic demands of collecting such data is repeatability, that is, a large amount of measuring must be conducted under nearly identical circumstances to provide the data and model parameters.

It is drawn in this paper that over 26000 “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. This way to collect traffic data is different from some traditional methods in which sensors are fixed along the road or buried underground to measure the “car velocity-traffic flow” data pairs. The obtained “velocity-headway distance” data pairs have better synchronized characteristics and are easy to transform into “velocity-density” or “flow-density” data pairs for further research.

After comparison study of manifold well-known traffic flow velocity-density models based on above measuring data, the superiorities of one-dimensional pipe-flow model are found in calculating the traffic flow parameters of expressway in our country.

Since the key parameter in 1-D pipe-flow model, named traffic behavior parameter m , can be adjusted, a basic method is proposed to draw the non-linear characteristics of traffic flow by 1-D pipe-flow model with changing parameters.

Key words traffic flow model, measuring data, 1-D pipe-flow model, traffic behavior parameter, non-linear

Received 19 February 2009, revised 10 June 2009.

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

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