



论文

国内典型大城市快速路交通流实测

吴胜春, 郑贤清, 郭明旻, 吴正*

复旦大学力学与工程科学系, 上海 200433

* 联系人, E-mail: wuzheng@fudan.edu.cn

收稿日期: 2010-10-14; 接受日期: 2011-04-28

国家自然科学基金资助项目(批准号: 10772050)

摘要 通过拍摄中国几个典型大城市不同快速路段的交通流录像并进行“车速-车头间距”数据采集, 建立了一个包含 210920 组交通流实测数据的大样本数据库, 根据实测数据得到的平均车速随着车头间距的增大而增大, 符合交通流的基本特征; 从超车道到交换道, 一般平均速度依次下降, 但在出口匝道影响下会出现“密度倒置”现象, 实测数据转换得到“流量-密度”基本图, 存在整个密度变化范围里都呈现非线性特征的类型, 在小间距数据中, 发现存在超过 7% 的“高速跟驰”车辆。

关键词 城市快速路, 交通实测, 数据统计, 密度倒置, 流量-密度基本图, 高速跟驰

PACS: 45.70.Vn, 06.90.+v, 05.65.+b

为了不同交通现象机理的解释和交通规划、交通智能管理的应用, 需要建立描述交通流状态变化的数学模型, 从本质上来说, 交通流模型的建立过程都需要依赖对实际交通现象的大量观测和深入分析, 其应用阶段也都需要依赖实际交通数据来辨识各种模型参数, 半个多世纪交通流模型研究的历史中, 可以看到不少基于实际测量的重要理论成果: 早期的“速-密关系”模型, 如 Greenshields 模型^[1]、Greenberg 模型等^[2]; 20 世纪 50~60 年代, 以 Pipes^[3], Chandler 等人^[4]和 Gazis 等人^[5]为代表的“车辆跟驰”模型; 20 世纪 70 年代 Payne 提出的交通流二阶微分方程模型, 其中“平衡函数”的表达式^[6]; 20 世纪 90 年代以后, Kerner 等人依据固定探测器自动记录的德国高速公路上大批“流量-速度”数据, 提出了“三相交通流”模型, 以及亚稳态、同步流、宽运动堵塞、自组织、相和相变、幽灵式拥堵等一系列概念, 引领了复杂交通

现象研究的前进方向^[7~11]。

根据 Kerner 等人的研究方法, 直接的测量对象是高速道路上连续交通流的流量、速度数据, 然后转换成“流量-密度”或“速度-密度”数据对, 再建立各种宏观模型对复杂交通现象进行分析, 由于流量测量需要一定长度的时间间隔, 而速度和密度都是即时信息, 所以这样的数据对从数学模型中变量的同时性角度看是精度较低的, 而随着科学技术的进步, 交通录像监控设备得到越来越广泛的使用, 如果能够采取适当的实测和数据处理方法, 在录像资料和交通流模型之间建立起恰当的联系, 就能方便、准确、可重复地收集大量实时变化数据并转换成各种模型参数, 为交通流模型的研究、应用提供基础^[12,13], 近年来, Helbing 对 Kerner 的实测数据又进行了新的研究分析, 揭示了“三相交通流”理论存在的一些缺陷, 同时深刻地指出: 需要更详尽的依托交通录像及相

引用格式: 吴胜春, 郑贤清, 郭明旻, 等. 国内典型大城市快速路交通流实测. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41: 791-800

Wu S C, Zheng X Q, Guo M M, et al. Survey report on urban freeway traffic flow of several typical cities in China (in Chinese). Sci Sin Phys Mech Astron, 2011, 41: 791-800, doi: 10.1360/132010-982

关信息处理技术的微观交通流实验数据,才能建立充分反映道路交通,尤其是拥堵形成阶段动力学特性的交通流数学模型^[14],

我国是一个高速发展中的大国,城市人口密度极大,道路交通存在着许多不同于西方发达国家的特征,最近十多年里,交通流数学模型及数值仿真研究已经在中国得到长足发展,但与此相应的实测研究,尤其是直接为交通流模型研究提供基础的测量研究,则还相当薄弱,这个问题已经引起国内一些学者关注,如 Guan 等人^[15-18], Liu 等人^[19]、Wang 等人^[20]都曾经采用视频检测等技术采集北京市快速交通干道的交通流数据,并对相应路段的交通特性进行各种分析,但由于数据采集方法的限制,数据量都比较少。

本文通过对上海、北京、西安、郑州 4 个城市多个高架或快速路段的实际交通过程长时间连续拍摄录像,用自行开发的计算机程序采集到视频资料中的“车速-车头间距”数据对 210920 组,建立了一个国内外交通流模型研究历史上从未有过的大样本微观“跟车”交通实测数据库,然后,对这些实测数据进行统计分析,并同已知的交通流模型进行比较研究,发现了一些中国道路上具有的复杂交通现象和规律,

为建立符合中国国情的交通流模型提供依据。

1 测量方法与实测数据

我们采用固定位置数码摄像方式,在某一路段的上方对该路段交通流进行长时间连续拍摄,然后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,图 1 显示了两种基本的拍摄位置和 3 个实际拍摄的场景:(i)在过街天桥上对前方路段正面拍摄;(ii)在路旁高层建筑里对路段侧向拍摄;(iii)北京学院路桥西侧过街天桥上拍摄的北四环路段;(iv)上海展览馆对面居民楼 12 层拍摄的延安高架路段;(v)郑州龙祥宾馆 12 层拍摄的金水路高架路段。

2008 年以来,我们先后在上海、北京、郑州、西安 4 个城市共 9 个高架或快速路段,拍摄了 40 天 200 多个小时的实际交通录像,这些录像包括了以下不同交通条件:(1)上下班高峰时段与普通时段;(2)双休日和工作日;(3)四季的不同;(4)晴天、雨天和雪天;(5)二车道、三车道和四车道;(6)平直路段和有较大坡度或弯度的路段;(7)进口匝道前、后,出口匝道前、后以及离匝道较远的路段等。

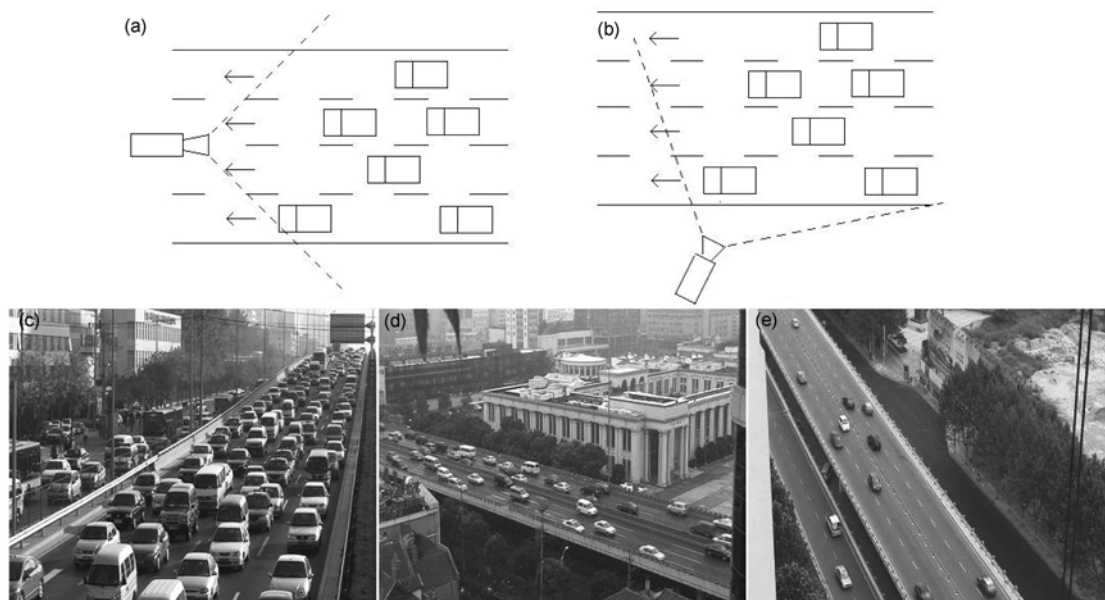


图 1 录像拍摄示意图

(a) 正面拍摄; (b) 侧面拍摄; (c) 北京四环路; (d) 上海延安高架; (e) 郑州金水路

Figure 1 Video recording. (a) Frontal shot; (b) side shot; (c) Beijing Fourth Ring Road; (d) Shanghai Yan'an Viaduct; (e) Zhengzhou Jinshui Road.

采集数据时, 首先任意选定一帧图形, 通过自行开发的计算机图像辨识软件或辅助人工干预手段, 确定行驶于同一车道上的相邻两辆车的代表性位置, 以画面上固定的分道线标志为参照系, 计算出二者之间的车头间距, 然后, 根据事先设定的时间间隔 (本文较多采用 0.8 s), 取出下一帧图形, 也通过图像辨识软件或人工干预手段确定这两辆车中后一辆此时的代表性位置, 并计算出这段时间间隔中该车移动的距离, 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“速度-车头间距”数据对, 由于这一过程中每帧图形上采集的是一辆 (人工方式) 或几辆 (自动方式) 代表性车辆, 而不是交通流中的全部车辆, 所以不存在漏检、超检等情况。

车头间距的倒数, 是单位长度路段的车辆数, 也就是单车道交通流密度, 它乘以车速则等于流量, 所以, 通过“速度-车头间距”数据对, 可以转换获得大量相应的“速度-密度”或“流量-密度”数据对, 它们比 Kerner 等人通过固定探测器测得的数据具有更好的同时性, 不过应该指出, 本文中提到的密度、流量, 除非特别说明, 都是根据单个车辆“速度-车头间距”换算得到的瞬时值, 可以称为“点密度”和“点流量”, 其平均值也只是所采集的车辆数据的平均值, 一般需要经过修正才能等同于按交通工程中通常定义的该路段平均密度和平均流量^[21]。

与其他测量方法相比, 除了同时性之外, 本文方法还具有以下优点: (i) 测量的原始资料比较容易获得, 可以通过拍摄, 也可以通过调用交通管理部门的监控录像获得这些资料 (我们尝试了调用美国加州交通运输局网上的实时监控录像进行研究); (ii) 数据采集工作的主要部分是在计算机上利用自行开发的程序完成的, 即使采用人工干预, 方法也比较简单, 经过短期培训的普通工作人员都可以承担; (iii) 更重要的是, 录像资料易于保存而且能够反复使用, 采集数据准确性可以用录像资料进行检验^[21], 其他研究者还可以利用我们保存下来的录像进行不同角度的数据提取和分析比较, 这对于交通流模型及其应用构成一个重要的研究平台, 这一测量方法的缺点是尚未考虑对所选车辆作车型分类。

下面估计一下本文方法的测速误差, 设两帧图形之间时间间隔为 t , 行驶距离为 L , 则车速 $V=L/t$, 由于录像画面存在透视变形, 确定代表性位

置时又有像素误差等原因, 测得的距离是 $L'=L\pm\Delta x$, 据此计算得到的车速是 $V'=L'/t$, 所以相

对误差 $\varepsilon=\left|\frac{V'}{V}-1\right|=\frac{\Delta x}{L}=\frac{\Delta x}{Vt}$, 根据我们的经验, 测

速时 Δx 控制在 0.5 m 以内是完全能够实现的, 因此, 以一段平均车速 $V=40\text{ km h}^{-1}$ 的路段为例, 如果时间间隔取为 0.8 s, 则有 $\varepsilon\leq 5.625\%$, 这样大小的相对误差是可以接受的, 又从绝对误差的角度看, 假定时间间隔仍取 0.8 s, 那么只要 $\Delta x\leq 0.66\text{ m}$, 就能保证不超出交通工程中通常允许测速误差 3 km h^{-1} 的范围, 一般而言, 为了控制相对测速误差, 对于平均车速较低的路段, 时间间隔应该适当长一些。

根据本节所述测量方法, 我们在所拍摄的录像中选择 16 d 56.5 h 具有不同代表性的录像进行了动态数据采集, 共获得 210920 条“车头间距-车速”数据, 组成包括 16 个样本的数据库, 表 1 给出了这些样本的拍摄信息、道路信息、平均交通数据和获得的数据量 (指计算机程序采集到的全部数据中, 经过筛选以后的结果), 筛选数据的标准是: (1) 车头间距 $d\geq 7\text{ m}$; (2) 车速 $v\leq 25\text{ m s}^{-1}$; (3) 一批数据中速度和间距不合格的比例不能超过 10%, 否则整批数据被淘汰, 由于这些样本数据量都很大, 并且包括了各种不同交通条件, 所以它们能够在相当程度上代表中国城市高架或快速路交通流的基本特征。

2 数据统计分析

2.1 按车头间距分组的平均车速

从表 1 中不难发现, 平均车头间距和平均车速之间存在一定的正相关, 即平均车头间距一般会随着平均车速的增大而增大, 为了进一步研究这两个变量的规律, 我们选取了 3 个晴天四车道的样本. 表 2 给出对其按不同密度 (亦即按不同车头间距) 分组的平均速度计算结果, 在表 2 中, 无量纲密度的定义是“点密度”除以单车道最大密度, 在本文实测中, 车头间距小于 7 m 的数据极少, 而大于 7 m 时明显增多, 所以把车头间距不小于 7 m 作为数据筛选标准, 对应单车道最大密度 $143\text{ veh km}^{-1}\text{ lane}$ 。

从表 2 的数据中仍然可以看到, 除了密度很大或很小的少数几组之外, 绝大部分分组中的平均车速都随着车头间距的增大而增大, 即平均速度是随密

表 1 四个城市 16 个交通流样本数据

Table 1 16 traffic flow data samples from four Chinese cities

样本 编号	拍摄时间(星期)	城市	地点	天气	平均车头 间距(m)	平均车速 (km h ⁻¹)	数据量	路段特征
1	2008-02-01-14:10~17:10(五)	上海	延安高架近陕西西路	雪天	20.89	36.73	12141	远离匝道
2	2008-07-21-07:40~16:50(一)	上海	延安高架近陕西西路	晴天	19.25	41.17	28044	远离匝道
3	2008-12-24-07:30~09:10(三)	上海	延安高架近陕西西路	雨天	18.96	30.72	5504	远离匝道
4	2008-12-29-07:30~08:20(一)	上海	延安高架近陕西西路	雨天	25.96	40.76	4804	远离匝道
5	2008-07-27-08:25~11:45(日)	上海	延安高架近陕西西路	晴天	32.37	56.42	11474	远离匝道
6	2008-10-17-14:05~15:15(五)	上海	南北高架近北京路	晴天	14.29	24.90	4716	出口匝道后
7	2008-01-29-14:00~16:05(二)	上海	南北高架近北京路	雪天	16.80	21.26	8957	出口匝道后
8	2009-07-13-06:00~07:40(一)	上海	内环高架近玉田路	晴天	26.48	36.83	3408	弯道
9	2009-07-14-07:50~11:15(二)	上海	内环高架近玉田路	晴天	18.34	24.86	1892	弯道
10	2008-11-03-08:30~11:00(一)	北京	四环路学院桥西	晴天	28.56	38.96	9795	入口匝道前, 下坡
11	2008-11-04-07:15~08:35(二)	北京	四环路学院桥西	晴天	24.65	40.38	6742	入口匝道前, 下坡
12	2008-11-02-14:10~16:00(日)	北京	四环路学院桥西	晴天	29.59	40.75	5608	出口匝道前, 上坡
13	2008-11-26-07:55~09:40(三)	西安	二环路雁塔立交	晴天	25.95	37.57	5952	进出匝道后, 下坡
14	2009-08-04-11:25~18:15(二)	西安	二环路长安立交	晴天	13.46	19.13	20592	进出匝道后
15	2008-08-25-08:35~16:50(一)	郑州	金水路高架	晴天	37.65	58.64	70184	进出匝道前, 下坡
16	2009-08-06-07:20~19:05(四)	郑州	金水路高架	晴天	30.51	48.86	11107	进出匝道前, 下坡
总计	—	—	—	—	—	—	210920	

表 2 按车头间距分组的数据量和平均车速

Table 2 Mean velocity and number of samples in different headway ranges

车头间距(m)	无量纲密度	样本 2 数据量	平均速度	样本 6 数据量	平均速度	样本 10 数据量	平均速度
>93.33	[0, 0.075]	—	—	—	—	104	67.96
(56,93.33]	[0.075,0.125)	129	50.05	—	—	833	65.97
(40,56]	[0.125,0.175)	570	51.97	13	47.47	1113	66.74
(31.11,40]	[0.175,0.225)	1546	49.44	51	37.63	1023	62.91
(25.45,31.11]	[0.225,0.275)	2584	48.12	159	33.95	1022	56.92
(21.54,25.45]	[0.275,0.325)	3349	45.88	246	29.17	927	51.24
(18.67,21.54]	[0.325,0.375)	3853	44.40	352	29.76	854	42.08
(16.47,18.67]	[0.375,0.425)	3788	42.95	397	29.95	814	38.37
(14.74,16.47]	[0.425,0.475)	3178	40.53	480	27.72	753	32.51
(13.33,14.74]	[0.475,0.525)	2659	38.53	541	25.39	671	30.21
(12.17,13.33]	[0.525,0.575)	2051	36.04	460	25.22	482	27.75
(11.2,12.17]	[0.575,0.625)	1517	33.10	477	23.72	380	25.65
(10.37,11.2]	[0.625,0.675)	1004	31.31	388	21.90	235	23.43
(9.66,10.37]	[0.675,0.725)	724	27.87	316	21.53	171	20.55
(9.03,9.66]	[0.725,0.775)	388	25.30	266	19.44	152	18.97
(8.48,9.03]	[0.775,0.825)	301	22.33	193	17.92	115	18.76
(8,8.48]	[0.825,0.875)	170	19.02	159	17.31	66	18.51
(7.57,8]	[0.875,0.925)	118	15.63	102	16.32	44	20.13
≤7.57	[0.925,1]	115	14.71	116	14.07	36	12.27
整体		28044	41.17	4716	24.90	9795	38.96

度增大而下降的,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,但由于交通流的复杂性,平均车速随密度增大而下降的规律在不同路段会有明显的区别,并非总是按线性函数形式变化,图 2 是根据表 2 中的数据画成的函数曲线,可以清楚地看出这一点.

2.2 车头间距和车速服从的概率分布

从上节表 2 中可以看到,对每一个样本而言,按车头间距大小分组以后得到的频数(即数据量)分布,都有一个峰值,并且从峰值向两侧几乎都是单调下降,频数分布的这一特征启示我们,可以假设车头间距、车速等随机变量服从正态分布(非负部分)或对数

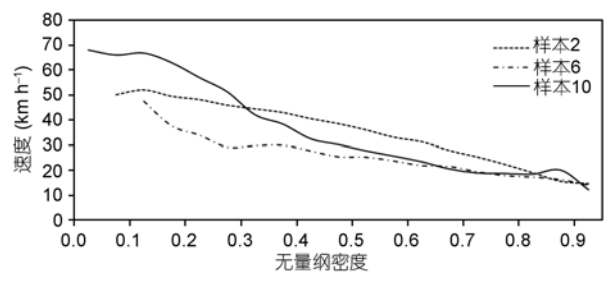


图 2 按车头间距分组平均后的“速度-密度”图
Figure 2 Averaged “velocity-density” relationships in different headway ranges.

正态分布, 表 3 使用 Kolmogorov-Smirnov 拟合优度方法进行假设检验, 结果显示大部分情况下假设被接受, 车头间距近似服从对数正态分布, 而车速则近似服从正态分布, 并且在分组得到的每一个小的样本中都有同样性质。

从表 3 中还可以看到, 对于车间距这一统计量而言, 其偏度系数基本都大于 1, 数据呈现明显正偏现象, 即大量数据集中于高密度区域, 反映了这些城市快速路在大部分时间里车流密度较大、交通比较拥挤的状况, 而峰度系数的变化范围较大, 其中样本 7 的峰度系数最高(图 3), 这是由于在雪天条件下, 车辆基本都保持在安全车距附近紧紧跟驰; 样本 2 代表的一类数据的峰度系数在 7~9 之间; 样本 13 代表的一类数据的峰度系数小于 5, 表明数据集中度相对较低, 与其交通状态相对最复杂有关。

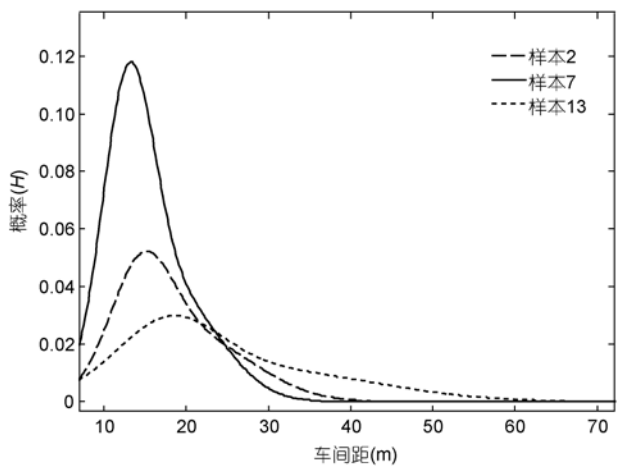


图 3 车头间距的概率分布
Figure 3 Probability distributions of headway.

从速度的概率分布来看, 偏度系数基本都在 -1.5~1 之间, 表现出较强的正态分布特性(图 4), 峰度系数大于 5 的样本只有 5 个, 其中最大的样本 4 为 8.1, 相比于车间距而言要小得多, 表明速度数据的集中度一般比车间距更低。

2.3 不同车道上的平均车速

我们再对所有样本按不同车道分别计算平均间距和平均速度, 结果发现: 按照常识, 从超车道到连接进出口匝道的交换道, 平均速度应该依次下降, 平均密度则应该逐渐上升, 在样本 1~5 和 8~11 这 9 个

表 3 各样本数据的统计结果

Table 3 The statistical results of data samples													
统计量	数据量	均值	标准差	偏度系数	峰度系数	拟合优度	统计量	数据量	均值	标准差	偏度系数	峰度系数	拟合优度
样本 1 车间距	12141	20.894	7.840	1.409	6.604	0.9892	样本 1 速度	12141	36.731	10.687	0.810	6.749	0.9939
样本 2 车间距	28044	19.252	8.132	1.755	8.117	0.9911	样本 2 速度	28044	41.171	13.039	-0.402	3.034	0.9782
样本 3 车间距	5504	18.956	8.651	1.811	8.100	0.9813	样本 3 速度	5504	30.723	9.869	-0.484	3.459	0.9564
样本 4 车间距	4804	25.964	12.245	1.370	5.058	0.9836	样本 4 速度	4804	40.761	8.336	-1.359	8.108	0.9932
样本 5 车间距	11474	32.371	16.145	1.159	4.134	0.9753	样本 5 速度	11474	56.418	12.172	-0.941	5.749	0.9937
样本 6 车间距	4716	14.293	5.491	1.591	6.843	0.9770	样本 6 速度	4716	24.898	10.739	0.642	4.834	0.9827
样本 7 车间距	8957	16.799	8.399	3.871	30.922	0.9936	样本 7 速度	8957	21.261	8.524	0.742	4.525	0.9832
样本 8 车间距	3408	26.481	17.270	1.467	5.134	0.9573	样本 8 速度	3408	36.831	19.759	-0.117	1.732	0.8532
样本 9 车间距	1892	18.343	11.876	2.609	11.562	0.9644	样本 9 速度	1892	24.859	16.591	0.863	2.522	0.8955
样本 10 车间距	9795	28.556	19.483	1.878	7.809	0.9734	样本 10 速度	9795	38.964	18.629	0.126	1.818	0.9392
样本 11 车间距	6742	24.653	10.378	1.591	7.408	0.9926	样本 11 速度	6742	40.375	18.065	-0.365	2.368	0.9170
样本 12 车间距	5608	29.593	12.292	1.181	4.781	0.9784	样本 12 速度	5608	40.751	17.448	-0.389	2.563	0.6340
样本 13 车间距	5952	25.945	13.120	1.213	4.255	0.9735	样本 13 速度	5952	37.575	10.102	0.044	4.147	0.9825
样本 14 车间距	20592	13.463	5.058	1.356	4.891	0.9878	样本 14 速度	20592	19.134	9.640	0.873	3.632	0.9962
样本 15 车间距	70184	37.654	20.173	1.181	4.145	0.9779	样本 15 速度	70184	58.637	10.958	-1.090	7.767	0.9953
样本 16 车间距	11107	30.507	13.277	0.943	3.641	0.9833	样本 16 速度	11107	48.865	14.102	-1.202	5.257	0.9763

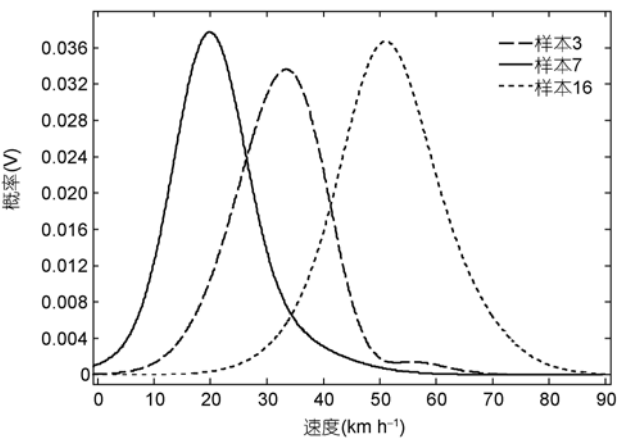


图4 车速的概率分布

Figure 4 Probability distributions of velocity.

样本中,基本上都能够符合这一规律.但另外7个样本显示的变化规律则不是这样简单,有些甚至与之恰恰相反,从超车道到交换道,平均速度非但没有依次下降,反而是逐步增大的,同时平均车头间距也在增大(即平均密度在逐渐下降),已有文献指出^[22],在一定条件下,可能出现这种“密度倒置”的现象:本来应该最为通畅的超车道,在实际交通中却变成了密度最大的拥挤车道;而本来应该最为拥挤的交换道却反而更为通畅,表4用样本2和样本6作为代表显示了两种路段的显著差别,说明在中国城市高架或快速路上确实存在“密度倒置”现象,表4中车道1为超车道,车道4为交换道.

深入分析“密度倒置”现象出现的原因,我们发现在样本6的数据提取范围上游200 m左右是一出口匝道,该出口再上游路段的车辆,只要不在该出口匝道驶出的话,就会尽量离开第4车道而驶入其余3个车道.留在第4车道的车辆绝大部分已在该出口离开高架道路,所以在数据提取范围内第4车道相对最通

畅,车速也最高,而其余3个车道都经常可见排队拥堵出现.而样本2的数据提取范围上游仅有进口匝道并且距离在300 m以上,所以不会出现类似的现象,这一结论告诉我们,在多车道交通流数学建模时,需要关注不同车道上的交通参数分布的差异性,尤其是出口匝道之后一定长度路段上的“密度倒置”现象.

3 “流量-密度”基本图

按照Kerner的观点^[10],交通流的流量-密度关系并非一条曲线,而应该是散布在流量-密度平面上一个二维区域中的点,可以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,二者合并构成“λ”形状,换句话说,在中、高密度状态下,车辆有时能以接近自由流的高速行驶,有时则只能以拥挤流的低速行驶,显现出各种复杂的非线性特征.

将上述16个样本中的“速度-车头间距”数据分别按照第一节所述换算成“点密度”和“点流量”,根据密度大小等距分成200组,同一组中的数据再按照速度大小排序,每连续10辆车的流量、密度平均值构成一个“流量-密度”数据点,则每个样本对应一幅“流量-密度”基本图,研究发现,这16个样本的“流量-密度”基本图大致可以分成3种类型:(1)以样本15为例,平均密度较低,交通通行状态良好,车辆大多以接近自由流的速度行驶,基本图表现出较强的线性自由流特征(图5(a));(2)以样本10为例,具有比较完整的从自由流到拥挤流的“λ”形变化过程,与Kerner的描述比较一致(图5(b));(3)以样本2为例,平均密度相对较高,交通经常处于中、高密度拥挤流状态,因此其表现出的非线性特征最强,即使其中低密度部分也基本上不具有自由流的形态(图5(c)).

表4 不同车道的实测平均车速

Table 4 Measuring averaged velocity of vehicles in different lanes

样本编号	车道	平均车头间距	平均车速	平均密度	平均流量	样本数量
样本2	1	21.05	44.42	41.91	1732.24	7735
	2	18.89	42.14	46.19	1806.61	5771
	3	18.49	39.80	45.95	1679.28	9547
	4	18.35	37.62	46.91	1603.14	4991
样本6	1	13.41	22.25	70.20	1494.96	1234
	2	14.13	24.54	67.99	1576.42	1426
	3	14.33	25.78	66.99	1609.37	1176
	4	15.75	28.02	60.62	1582.56	880

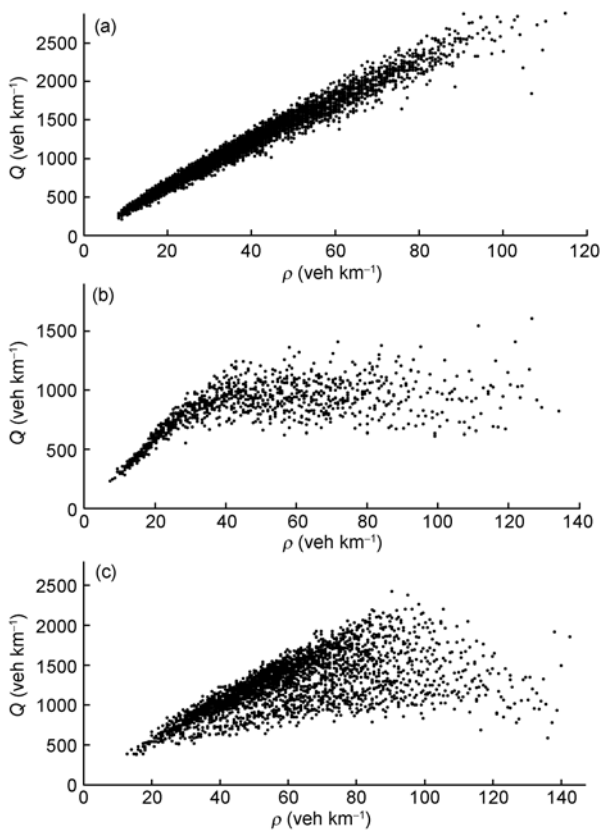


图 5 流量-密度基本图

(a) 样本 15; (b) 样本 10; (c) 样本 2

Figure 5 Flow-density fundamental diagram. (a) Sample 15; (b) Sample 10; (c) Sample 2.

通过本文实测得到的中国城市高架或快速路“流量-密度”基本图，绝大部分也都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，与 Kerner 的描述本质上是一致的，但由于我国城市道路总体拥挤程度大大高于西方发达国家，所以在本文实测数据中包含一大批前人文献很少关注的密度大于 80 veh km^{-1} 甚至 100 veh km^{-1} (车头间距小于 12.5 m 甚至 10 m) 的数据，其中相当比例数据的流量或者车速也很高(“高速跟驰”)，用经典的“速-密关系”模型、

平衡函数表达式，或者“ λ ”形基本图，都不能准确描述它们，总体而言，随着路段平均密度的增大，道路的自由流特征将越来越不明显，可能在全部密度变化范围内都呈现非线性，需要提出新的理论模型对此进行刻画。

4 不同拥挤程度下的车辆运动特征分析

上节已经指出，本文得到的中国城市高架或快速路实测交通数据中，存在一大批高密度数据，其中还有相当比例的“高速跟驰”数据。另一方面，从交通流的元胞自动机混合模型^[23]，到 MCLWR 宏观流体力学模型^[24]，实质上都是将道路上的车流看成多种具有不同特征速度车辆的叠加，因此这些模型应用时就需要确定区分各类车辆的速度标准，以及混合车流中各种车辆所占比例，这就涉及到对实际车流中具有不同特征驾驶行为的车辆进行定量分析，本文采集的大样本跟车数据已经为这一分析提供了基础。

表 5 给出了本文采集的全部数据中，按不同车速或车头间距范围选定的子样本的频数，及其在总样本中的占比(频率)。不同的子样本代表着不同特征的驾驶行为，通过表 5 可以看到：

(1) 速度小于或等于 1 m s^{-1} (3.6 km h^{-1} ，相当于步行速度)的数据总量只占 0.84% ，速度小于或等于 3 m s^{-1} (10.8 km h^{-1} ，略高于自行车速度的一半)的数据总量也只占 4.17% ，这些低速车辆占比较高的路段是上海内环、北京四环和长安立交，如果把这些低速车辆视为“时走时停”中“停”的部分，那么，在中国城市高架或快速路交通流中“时走时停”现象确实存在，但“停”的比例并不很高。

(2) 是否因为我们所取样本都是交通非常通畅的情况，才导致得出以上结论呢？答案是否定的：车头间距小于或等于 12.5 m 的高密度数据占比 13.85% ，即使把标准提高到车头间距小于或等于 10 m 甚至

表 5 不同驾驶行为车辆频数统计

Table 5 Frequency of vehicles in different driving actions

拥挤程度	总体	占比(%)	$V \leq 1$	占比(%)	$V \leq 3$	占比(%)	$V \geq 8$	占比(%)	$V \geq 10$	占比(%)	$V \geq 12.5$	占比(%)
总体	210920	100.00	1778	0.84	8797	4.17	161173	76.41	141501	67.09	111681	52.95
$h \leq 12.5$	29218	13.85	611	2.09	4876	2.31	7514	3.56	4747	2.25	2394	1.14
$h \leq 10$	11602	5.50	396	3.41	3055	1.45	1536	0.73	852	0.40	369	0.17
$h \leq 8$	2442	1.16	151	6.18	929	0.44	180	0.09	86	0.04	48	0.02

8 m, 则仍分别占比 5.50% 和 1.16%, 小间距高密度车辆占比较高的路段是长安立交、南北高架和上海内环, 这样大量的高密度跟车数据, 在以前国内外文献中均未出现过, 它们足以刻画中国城市高架或快速路交通拥堵的严重程度。

(3) 进一步将高密度数据按速度大小再分组统计, 结果发现这些小间距车辆并非都是低速行驶, 即使在车头间距小于或等于 8 m 的数据中, 速度小于或等于 3 m s^{-1} 的也只占 38.04%, 速度小于或等于 1 m s^{-1} 的更是只占 6.18%, 而速度大于或等于 8 m s^{-1} (28.8 km h^{-1} , 相当于流量大于或等于 3600 veh h^{-1}) 的“高速跟驰”数据则占 7.37% (全部数据中占比为 0.09%), 同样, 在车头间距小于或等于 10 m 的数据中, 速度大于或等于 10 m s^{-1} 的占比 7.34% (全部数据中占比为 0.40%); 在车头间距小于或等于 12.5 m 的数据中, 速度大于或等于 12.5 m s^{-1} 的占比 8.19% (全部数据中占比为 1.14%), 在各个城市不同路段普遍存在一定比例的“高速跟驰”车辆, 是本文通过实测发现的中国城市高架或快速路交通流的一个重要特征。

(4) “高速跟驰”现象还能通过车头间距 $h(\text{m})$ 与车速 $v(\text{m s}^{-1})$ 的比值, 即车头时距(sec)刻画, 车头时距 $h/v \leq 1 \text{ s}$ 的数据总共有 10123 组, 占比 4.80%; $h/v \leq 0.8 \text{ s}$ 的数据总共有 2627 组, 占比 1.25%; 小时距车辆占比较高的路段是延安高架(晴天, 尤其双休日)和郑州金水路, 占比最低的路段则是南北高架(雪天)、长安立交和延安高架(雨天), 这一结果显示“高速跟驰”现象主要出现在交通畅通的条件下, 它是总体交通畅通条件下的“时密时疏”, 而不是总体交通拥堵情况下的“时快时慢”, 这与我们在现实中可以观测到的现象相符: 在低密度高速交通中, 有时会出现一段高密度的车辆, 其速度却明显高于通常处于该密度时应有的速度, 图 6 给出了一个拍摄于郑州金水路高架的典型“高速跟驰”过程: 该路段整体密度很低, 左图向下方向车流中出现了一段小间距的密集车队, 左边车道红线上方相邻两辆车车头间距只有 15 m 左右; 右图是 2 s 后的情景, 这两辆车跟随着向前行驶了大约 33 m, 平均速度达到 60 km h^{-1} 以上。

(5) 不同特征驾驶行为显然也能用车头时距 h/v 描述, 即在一定的密度下, 实际车速与“平衡速度”的差别有多大, 如果把全部车辆分成“谨慎型”和“激进型”两大类^[23], 分别以 $h/v > 1.5 \text{ s}$ 和 $h/v < 1.5 \text{ s}$ 作为标准,

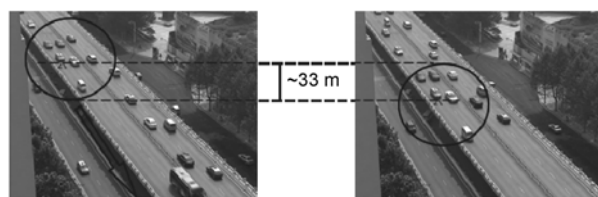


图 6 高速跟驰现象示意图

Figure 6 High speed car-following: an example.

则按本文实测数据, 中国城市高架或快速路上“激进型”车辆总体占比约 24.69% (不同城市不同道路比例也应有所不同), 又如果在实际交通工程问题中应用 MCLWR 模型, 则可以把车头时距分成几个区间, 按照实测得到的数据确定每个区间的占比, 它就能够作为模型中不同层次车辆所占比例。

总之, 实测结果及其分析告诉我们, 研究中国城市高架或快速路的交通流模型及其应用, 应该非常关注高密度(小间距)车辆的特征, 其中包括出现在总体交通通畅条件下的“时密时疏”现象, 这些现象需要适当的非线性数学模型来描述, 但它们未必就是“时走时停”或同步流等概念所能包含, 所以后者不应成为判断一个交通流理论模型好坏的唯一标准。

5 结论与展望

(1) 本文采用自行设计的数据采集方法, 通过对上海、北京、西安、郑州等城市多个快速路段的实际交通过程进行录像拍摄和数据采集, 建立了包括不同交通条件下 21 万多组交通流实测数据的大型数据库, 它们能够在相当程度上代表中国城市高架或快速路交通流的基本特征。

(2) 无论是不同道路之间比较, 还是同一道路不同车道之间比较, 实测平均车速均随着车头间距的增大而增大, 表明它们能够准确刻画交通流的基本性质: 路段上车辆越稀少, 交通服务水平越高, 则平均车速就越快, 实测数据同时表明, 从超车道到交换道, 一般平均速度依次下降, 但在出口匝道之后一定长度路段上存在值得引起重视的“密度倒置”现象。

(3) 实测数据转换得到的“流量-密度”基本图可以分成 3 种类型: 基本为线性的自由流; 完整的从自由流到非线性拥挤流; 在整个密度变化范围里基本都呈现非线性特征, Kerner 等给出的基本图能够包括前面两种类型, 在我国城市高密度交通特征下还存

在第 3 种类型, 需要提出新的理论模型对此进行刻画.

(4) 在中国城市高架或快速路交通流中, “时走时停”现象确实存在, 但“停”的比例并不很高, 而在高密度(小间距)数据中, 存在超过 7%的“高速跟驰”车辆, 它是总体交通畅通条件下的“时密时疏”, 而不是总体交通拥堵情况下的“时快时慢”, 这些现象需要适当的非线性数学模型来描述, 它们可能比“时走时停”具有更重要的意义.

本文提出的跟车数据实测方法, 其实不仅能够

构建大样本数据平台, 在其过程中还能够获得关于各种交通流参数的大规模“时间序列”, 从而为采用时间序列分析方法进行交通流时变非线性特征研究奠定了基础, 利用本文实测数据, 可以进一步展开有关天气、道路线型、限速标准等因素对城市快速路交通流影响的研究, 此外, 本文方法可以推广到“加速度-车间距-车速-速度差”数据的采集, 而这正是 Helbing 建议的利用录像资料进行微观交通行为研究, 以建立更加合理的交通拥堵形成阶段交通流模型的基础.

致谢 本文工作得到上海大学戴世强、董力耘、张鹏等老师的大力支持, 他们曾与作者进行了多次有益的讨论.

参考文献

- 1 Greenshields B D. A study in highway capacity. Highway Res Board Proc, 1934, 14: 448–477
- 2 Greenberg H. An analysis of traffic flow. Ops Res, 1959, 7: 79–85
- 3 Pipes L A. An operational analysis of traffic dynamics. J Appl Phys, 1953, 24: 274–281
- 4 Chandler R E, Herman R, Montroll E W. Traffic dynamics studies in car following. Ops Res, 1958, 6: 165–184
- 5 Gazis D C, Herman R, Rothery R W. Nonlinear follow the leader models of traffic flow. Ops Res, 1961, 9: 545–567
- 6 Payne H J. FREFLO: A macroscopic simulation model of freeway traffic. Transpn Res Rec, 1979, 772: 68–75
- 7 Kerner B S, Rehborn H. Experimental features and characteristics of traffic jams. Phys Rev E, 1996, 53(2): 1297–1300
- 8 Kerner B S, Rehborn H. Experimental properties of complexity in traffic flow. Phys Rev E, 1996, 53(5): 4275–4278
- 9 Kerner B S. Experimental features of self-organization in traffic flow. Phys Rev Lett, 1998, 81(17): 3797–3800
- 10 Kerner B S. Experimental features of the emergence of moving jams in free traffic flow. J Phys A-Math Gen, 2000, 33(26): 221–228
- 11 Kerner B S. Empirical macroscopic features of spatial-temporal traffic patterns at highway bottlenecks. Phys Rev E, 2002, 65(4): 6138–6167
- 12 Wu Z, Zhu H, Jia N. Measuring method study of the traffic flow model parameters based on video recording of expressway traffic (in Chinese). J Fudan Univ Nat Sci, 2008, 47(2): 147–152 [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(2): 147–152]
- 13 Zheng X, Wu Z, Xu S, et al. Video-based measurement and data analysis on traffic flow of urban expressway. Acta Mech Sin, in press
- 14 Schonhof M, Helbing D. Criticism of three-phase traffic theory. Transpn Res B, 2009, 43: 784–797
- 15 Guan W, He S Y. Phase identification of urban freeway traffic based on statistical properties (in Chinese). J Transpn Sys Eng Inform Tech, 2007, 7(5): 42–50 [关伟, 何蜀燕. 基于统计特性的城市快速路交通流状态划分. 交通运输系统工程与信息, 2007, 7(5): 42–50]
- 16 Guan W, He S. Statistical features of traffic flow on urban freeways. Physica A, 2008, 387: 944–954
- 17 He S Y, Guan W. Empirical analysis of phase transitions of traffic flow at urban expressway (in Chinese). China J Highway Transport, 2008, 21(5): 27–32 [何蜀燕, 关伟. 城市快速路交通流状态跃迁的实证分析. 中国公路学报, 2008, 21(5): 27–32]
- 18 Yuan Y M, Guan W, Wu J. Urban expressway traffic states analysis based on video detection technique (in Chinese). Traffic Comput, 2008, 26(4): 1–3 [袁月明, 关伟, 吴建平. 基于视频检测技术的城市快速路交通状态分析研究. 交通与计算机, 2008, 26(4): 1–3]
- 19 Liu S Y, Guan J Z, Jiang X X, et al. Quantify measure of Beijing freeway traffic status based on characteristics figures (in Chinese). J Transpn Sys Eng Info Tech, 2009, 9(1): 39–44 [刘曙云, 关积珍, 蒋心晓, 等. 基于特征图的北京市道路交通状况量化指标的研究. 交通运输系统工程与信息, 2009, 9(1): 39–44]
- 20 Wang Z L, Shao C Q, Rong J, et al. Analysis of traffic flow characteristics and states of urban arterial street in Beijing (in Chinese). Traffic Info Safety, 2009, 27(3): 155–159 [王子雷, 邵长桥, 荣建. 北京市主干路基本路段交通流特性及状态分析. 交通信息与安全, 2009, 27(3): 155–159]
- 21 Lin Z X, Wu Z, Yang C H, et al. A comparative study on traffic flow models based on video of Yanan Expressway of Shanghai (in Chinese).

- J Hydrodyn A, 2010, 25(5): 683-693 [林展熙, 吴正, 杨朝晖, 等. 基于上海延安高架录像资料的交通流实测研究. 水动力学研究与进展 A, 2010, 25(5): 683-693]
- 22 Nagel K, Wolf D E, Wagner P, et al. Two-lane traffic rules for cellular automata: A systematic approach. Phys Rev E, 1998, 58(2): 1425-1437
- 23 Wu K F, Kuang H, Kong L J, et al. Study of a cellular automaton FI-and-NS mixed model for traffic flow (in Chinese). J Guangxi Normal Univ Nat Sci, 2005, 23(4): 8-12 [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(自然科学版), 2005, 23(4): 8-12]
- 24 Wong G C P, Wong S C. A multi-class traffic flow model: An extension of LWR model with heterogeneous drivers. Transpn Res A, 2002, 36(9): 827-841

Survey report on urban freeway traffic flow of several typical cities in China

WU ShengChun, ZHENG XianQing, GUO MingMin & WU Zheng^{*}

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

Based on videos of traffic flow at several urban freeway sections of some typical cities in China, a large database which contains 210920 "vehicle speed-headway distance" data pairs measured from the real traffic flow is obtained. The measured data show consistent with the fundamental nature of traffic flow since their average speeds increase as the headway distances increase. The average speed usually decreases from ultra-lane to exchange-lane, but there exist "density inversion" cases when the road sections are nearly exits. It is found from the flow-density fundamental diagrams drawn by the measured data that there is a type of basic graph in which nonlinear characteristics show in almost the whole density area. Over 7% "high speed car-following" vehicles are found in the small headway areas.

urban freeway, traffic measurement, data statistics, density inversion, flow-density fundamental diagram, high speed car-following

PACS: 45.70.Vn, 06.90.+v, 05.65.+b

doi: 10.1360/132010-982