

基于交通实测的交通流密度特性分析

祝会兵¹, 郭丽敏¹, 张柠溪², 郭明旻³, 费莉¹

(1. 宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;

3. 复旦大学 力学与工程科学系, 上海 200433)

摘要: 为揭示交通流密度的本质特征, 对上海延安高架和郑州金水路高架上交通流实测密度值进行了统计分析. 利用贝塔函数对数据进行曲线拟合, 得出了车辆密度的概率密度分布基本符合贝塔分布的结论; 进而基于 NaSch 元胞自动机交通流模型, 考虑车辆密度的概率密度特征, 通过数值模拟得到了交通流的流量—密度图, 呈现出一个二维分布的区域, 与实测结果吻合良好, 进一步验证了车辆密度的概率密度特征. 结论可为交通流建模以及交通工程的规划和管理提供理论参考.

关键词: 城市交通; 概率密度; 统计分析; 车辆密度; 贝塔分布

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2015) 04-0020-05

交通流中的车辆密度与流量、速度一起构成了交通流的 3 个主要参数, 研究车辆密度对掌握交通流的动力学特征、交通堵塞状况以及道路的通行能力等都具有十分重要的意义.

交通流密度检测手段, 从早期 Gazis 等人^[1]利用路段进出口的流量和速度数据来粗略地估计路段密度, 发展到丹尼尔等人^[2]利用时间占有率来估算交通流密度, 而如今随着传感器技术、信息技术和通信技术的发展, 利用定点检测器数据进行交通流密度估计得到了广泛的应用^[3]. 同时, 近年来吴正^[4]、唐铁桥^[5]等人利用数码摄像机对包括交通流密度的交通流参数进行测量和分析, 得到了一些有意义的成果.

虽然人们对交通流密度的实测技术已有很多研究, 也得到了很多可供参考的实测资料, 但对路段的实测密度值进行概率密度统计, 概括交通流密度的普遍特征的研究成果还不多见, 而交通流密度有规律的分布情况对于交通流建模和仿真计算恰恰具有非常重要的意义. 交通现象纷繁复杂, 为了刻画不同的交通现象和机理、完善智能交通的管理方法, 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. 半个多世纪交通流模型研究的历史中, 可以看到许多基于实际测量的重要理论成果, 但是人们似乎更多关注流量和速度这 2 个交通流参数, 对交通流密度的特性研究还有待深入, 这也是许多交通流模型有待完善的原因之一.

本文对交通流的实测密度进行概率密度统计分析, 进而得到它的分布规律, 结合交通流模型验证车辆密度的概率密度特征, 研究结果将对道路交通的规划、施工和管理提供理论参考.

1 基于实测数据的车辆密度特性分析

1.1 交通流实测数据的采集

以复旦大学吴正、郭明旻等人实测得到的上海延安高架和郑州金水路高架上的视频资料^[6]为研究对象, 提取实测数据中的“车速—车头间距”数据对, 得到每辆车的瞬时速度和密度, 它们的乘积就是“点流量”, 为了使得从跟车数据出发计算得到的流量与实际数据相符, 引入了“空置系数”, 从而计算得到交通流的平均密度和平均流量值^[7-8].

上海延安高架双向四车道,横贯上海东西,两端分别连接虹桥交通枢纽和浦东新区,中间经人民广场等闹市中心区,车流十分繁忙,是上海城市快速路系统的重要组成部分,也可看作是中国城市快速路交通流研究的一个典型代表;而金水路高架是郑州市的主干道,道路周边机关单位密集,在郑州的道路交通网络中处于极为重要的地位。

笔者选取上海延安高架路段 2008 年 7 月 21 日上午 7 点 40 分至下午 4 点 50 分的交通流录像资料,从中提取 28 000 余组实测数据,选取郑州金水路高架 2008 年 8 月 25 日上午 8 点 35 分至下午 4 点 50 分的交通流录像资料,从中提取 70 000 余组交通流实测数据,作为本文分析的基础数据。数据中的密度值都经过了空置系数的调整,转化为平均密度。

1.2 实测车辆密度的统计分析

按照 NaSch 元胞自动机模型^[5]中的规定,假设每辆车所占道路长度为 7.5 m,那么密度单位“辆/千米”即可化为无量纲参数。在严重拥堵的情况下,以此方式所得的无量纲密度可能会大于 1,此时将其视为 1。

把介于 0~1 之间的密度值分成 100 个区间,即密度区间为 0.01,统计各个时间段中落在这些区间上的车辆数,得到 100 个对应的频数值,将其绘成车辆密度随时间的分布图(图 1),其中,图 1(a)表示上海延安高架上的情况,图 1(b)表示郑州金水路上的情况。由图可见,车辆密度的频数分布图呈现两头低、中间高的钟形图像。

此外还可以看到,在 2 条交通状况不尽相同的道路上,在不同时间段内,车辆密度的分布都会出现频数的峰值,不同时间段中密度频数的峰值大小不等,其对应的密度区间也会有所不同。如延安高架 8:10~8:40 以及 8:40~9:10 的 2 个时间段中的密度频数峰值所对应密度区间是[0.4, 0.5], 9:10~9:40 时间段中密度频数峰值所对应的密度区间是[0.3, 0.4], 而 9:40 以后的各个时间段中密度频数峰值所对应的密度区间几乎都是[0.2, 0.3]。说明早高峰出现在 8:10~9:10,此时车辆密度最大,接下来密度逐渐减小,而大部分的密度值在 0.2~0.3 之间,直到下午 16:50 还没有出现晚高峰。

而在金水路上,从 8:35~16:50 的连续 8 个多小时的实测数据中,除了在 12:35~14:15 时段内密度

频数峰值所对应的密度区间是[0, 0.1]以外,其他时段密度频数峰值所对应密度区间都是[0.1,0.2],说明金水路上的流量比较低,道路通畅。

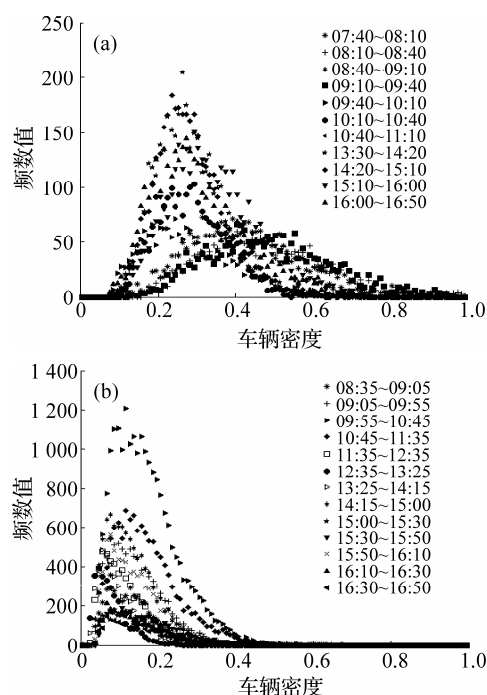


图1 密度区间间隔为 0.01 时各时段车辆密度分布

1.3 实测车辆密度的概率密度分布

假设通过实测共得到了 n 个实测车辆密度值,经过无量纲变换后,密度值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$. 这是一组离散型的随机变量,为了计算车辆密度的概率密度分布列,可将车辆密度在 0~1 的区间内平均划分成 m 个子区间(m 组),组距为 $1/m$,各组的车辆密度中位数设为 x_k ,且 $k \in \{1, 2, \dots, m\}$. 因此此时的车辆密度的概率密度值等于各组的概率除以组距。

假设有 j 个车辆密度落在第 k 个区间,则该区间上的车辆密度的概率密度统计值 $y(x_k)$ 为:

$$y(x_k) = (j/n) / (1/m) = j \cdot m / n. \quad (1)$$

如此经过 m 次计算,即可得到这 m 个子区间内车辆密度的概率密度分布列。

分别取延安高架 28 044 个实测车辆密度数据和金水路 70 184 个实测车辆密度数据作为研究对象。对密度值进行无量纲化处理,并对其进行分组,各划分 100 个密度区间,统计出各个密度区间内实测车辆密度的个数,计算 2 条道路上车辆密度的概率密度分布列,最后绘制出车辆密度的概率密度

分布图,如图2中的散点所示,其中,图2(a)表示上海延安高架,图2(b)表示郑州金水路。由图可见,延安高架概率密度的最大值约为3.5,对应的密度值是0.3左右;而金水路概率密度的最大值约为6.5,对应的密度值是0.08。说明金水路上出现0.08密度值的时刻比延安高架出现0.3密度的时刻更加频繁,也就是金水路上密度的变化更平稳,基本保持不变。另外,也表明了延安高架上车辆密度为0.3是最常见状态,而在金水路上通常的车辆密度是0.08,那么延安高架是一条繁忙的城市快速路,而金水路相对来说车流量不多,运行条件较好,它们代表着2种截然不同的道路情况。

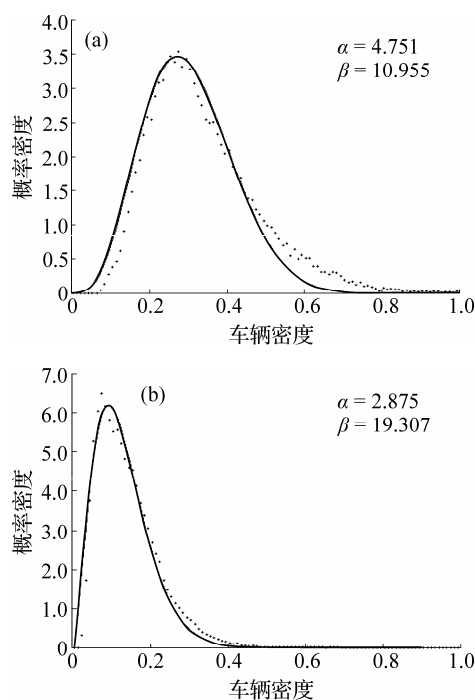


图2 实测车辆密度的概率密度的拟合曲线

虽然道路繁忙程度不同,但车辆密度的概率密度分布图像都呈现出中间大、两头小的钟形形状,与前面分时段的分析结果一致,说明这是车辆密度的普遍特性。考虑到无量纲化后的密度值介于0~1之间,而车辆密度的概率密度分布图与贝塔分布的图像非常相似,那么是否可以用贝塔分布函数对车辆密度的概率密度分布列进行拟合呢?

2 实测车辆密度的函数拟合

2.1 函数拟合

运用最小二乘法原理对实测车辆密度进行曲

线拟合,贝塔分布的概率密度函数通式为:

$$f(x; \alpha, \beta) = \frac{x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}}{\int_0^1 u^{\alpha-1}(1-u)^{\beta-1} du} = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}, \quad (2)$$

式中, α 及 β 是贝塔分布概率密度函数的参数; x 是自变量,这里是指车辆密度的实测值,经过无量纲变换以后,满足 $x \in [0, 1]$ 。

首先在实测车辆密度的各子区间内,计算它的概率密度分布与贝塔分布理论值离差的平方和 W ,表示如下:

$$W(\alpha, \beta) = \sum_{k=1}^m (y(x_k) - f(x_k, \alpha, \beta))^2, \quad (3)$$

式中, $y(x_k)$ 表示第 k 个区间上的车辆密度的概率密度统计值, $f(x_k, \alpha, \beta)$ 表示第 k 个区间上车辆密度的概率密度理论值, α 和 β 为待定参数。

W 是关于 α, β 的二元函数,使其最小是曲线拟合的最优判据。但由于 W 存在连续偏导,因此有且仅当 $\partial W / \partial \alpha = 0$, $\partial W / \partial \beta = 0$ 成立时, W 取最小值。此时联立求解该2个方程,即可求得 α 和 β 的值。

依据以上拟合方法,分别对2条道路的总体实测数据进行贝塔分布的函数拟合,通过计算得到,上海延安高架的 α 值为4.751, β 值为10.955;郑州金水路高架的 α 值为2.875, β 值为19.307。图2中的实线为拟合曲线,散点是实测结果,图2(a)表示上海延安高架,图2(b)表示郑州金水路高架。由图可见,曲线拟合的吻合程度较好。

2.2 函数拟合的优度检验

为对曲线的拟合质量做进一步分析,需计算函数拟合的优度。还是将车辆密度从0~1划分成 m 个区间,将各区间的车辆密度中位数设为 x_i ,且 $i \in \{1, 2, \dots, m\}$,则可算得对应实测车辆密度的概率密度值 y_i ,假设平均值为 $\bar{y}$,即:

$$\bar{y} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_i.$$

设按照贝塔函数拟合得到的概率密度值为 Y_i ,平均值为 $\bar{Y}$,即:

$$\bar{Y} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Y_i.$$

则曲线拟合的相关系数表示如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2 \cdot \sum_{i=1}^m (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (4)$$

相关系数的平方 R^2 为判定系数, 是度量拟合优度的统计量. 拟合优度是指拟合曲线对观测值的拟合程度, R^2 的取值范围是 $[0, 1]$, R^2 的值越接近 1, 说明拟合程度越好; 反之, R^2 的值越接近 0, 说明拟合程度越差.

通过计算可以得到, 上海延安高架的判定系数是 0.972, 郑州金水路高架的判定系数是 0.975, 都非常接近于 1, 因此我们可以认为拟合质量是好的, 车辆密度的概率密度分布符合贝塔分布.

3 车辆密度特性对交通流的影响分析

利用交通流模型分析交通流特性时, 经常采用流量—密度图来展示流量随密度的变化规律, 如以 NaSch 模型^[9]为代表的元胞自动机交通流模型. 但这些模型往往忽视各种密度的出现概率, 这与上面的分析显然不符. 这里, 笔者对 NaSch 模型进行修正, 认为车辆密度的概率密度分布符合贝塔分布, 采用上海延安高架的实测密度拟合得到贝塔分布函数, 在以下的数值模拟中假设车辆密度的出现是遵循此贝塔分布的规律, 同时采用与 NaSch 模型相同的车辆更新规则, 设定城市快速路的限速为 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 由此计算相应的流量值, 得到流量—密度图(图 3(a)). 图 3(b)是根据上海延安高架路段上实测数据得到的流量—密度图, 可以看到, 模拟结果与实测结果较为接近. 为比较, 也给出了完全按照 NaSch 模型模拟得到的流量—密度图(图 3(c)), 图形显示的是一条单一的曲线.

从图 3 还可以看到, 当我们认为车辆密度的概率密度符合贝塔分布时, 模拟得到的流量—密度关系是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. 如图 3(a)所示, 在这个区域中, 对应同个密度, 车辆既可能以自由流状态高速行驶, 也可能以拥挤流状态低速行驶^[4], 与实测结果(图 3(b))非常吻合, 也与 Kerner 通过大量的交通实测得到的结论一致^[10-11], 而不再是像传统的交通流模型所揭示的那样呈现出一条单一的曲线(图 3(c)). 最近, 唐铁桥等人基于交通实测数

据建立了多车道交通流模型, 其中展示的实测流量—密度图也有相同的二维区域分布的特性^[5], 且与本文的模拟结果(图 3(a))比较吻合.

从以上的分析中可以发现, 当我们认为交通流密度遵循贝塔分布规律时, 据此建立交通流模型模拟得到的交通流特性更加符合实测结果, 因

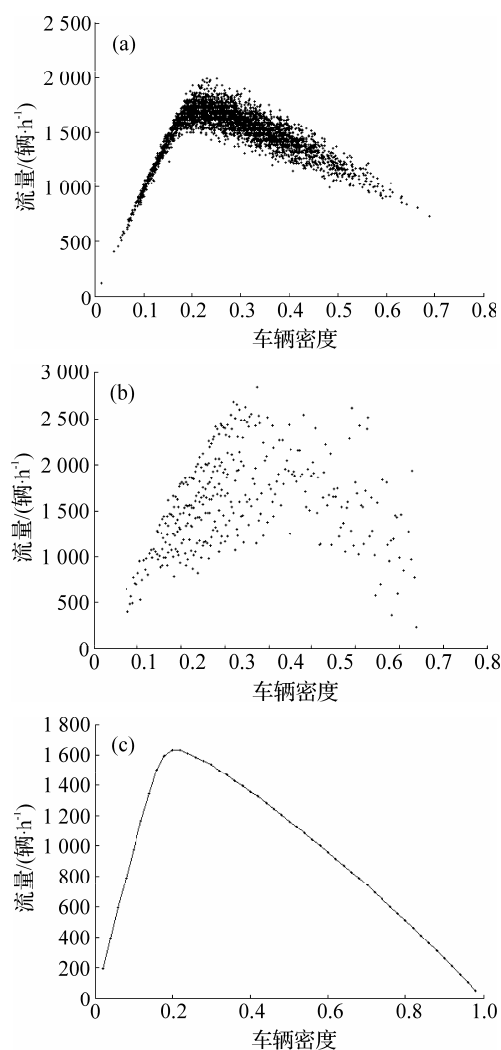


图3 交通流的流量—密度关系

此建立的交通流模型更加合理有效.

4 结论

通过对上海延安高架和郑州金水路高架上的交通密度实测值进行统计分析, 发现不管交通的繁忙程度如何, 车辆密度的概率密度分布图都呈现出中间大、两头小的钟形形状. 进而利用贝塔函数对实测车辆密度的概率密度值进行曲线拟合, 拟合图像显示拟合结果良好, 拟合优度的检验结

果也证明了此点. 因此, 我们得出结论, 车辆密度的概率密度分布基本符合贝塔分布. 在此基础上, 我们还利用交通流的 NaSch 元胞自动机模型, 考虑车辆密度的概率密度特征, 建立新的交通流模型, 对交通流进行数值模拟, 得到的流量—密度图呈现出一个二维分布的区域, 与实测结果较为吻合. 文中没有对该模型所揭示的交通流动力学特征做进一步的探讨, 这将是我們接下来的研究内容. 本文的结论有助于交通流的仿真模拟, 对交通运输工程的规划和管理也有一定的参考价值.

参考文献:

- [1] Gazis D C, Knapp C H. On line estimation of traffic densities from time series of flow and speed data[J]. Transportation Sciences, 1971, 5(3):283-301.
- [2] 丹尼尔 L 鸠洛夫, 马休 J 休伯. 交通流理论[M]. 蒋璜, 译. 北京: 人民交通出版社, 1983:125-188.
- [3] 胡小文, 杨东援. 城市快速道路交通流密度的估计[J]. 交通运输系统工程与信息, 2008, 8(3): 79-82.
- [4] 吴正, 朱辉, 贾南. 基于快速路交通录像的交通流模型参数测量方法研究[J]. 复旦学报: 自然科学版, 2008, 47(2):147-152.
- [5] Tang Tieqiao, Wang yunpeng, Yang Xiaobao, et al. A multilane traffic flow model accounting for lane width, lane-changing and the number of lanes[J]. Netw Spat Econ, 2014, 14: 465-483.
- [6] 吴正, 郭明旻. 交通实测视频与数据共享平台[EB/OL]. [2014-11-18]. <http://traflow.fudan.edu.cn/index.html>.
- [7] 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[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2010, 25(5):683-693.
- [8] 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[J]. 中国科学: 物理学、力学、天文学, 2011, 41(6):791-800.
- [9] Nagel K, Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic[J]. J Phys I(France), 1992, 2(12):2221-2233.
- [10] Kerner B S. Empirical macroscopic features of spatial-temporal traffic patterns at highway bottlenecks[J]. Phys Rev E, 2002, 65:46138-46141.
- [11] Kerner B S. Complexity of spatiotemporal traffic phenomena in flow of identical drivers: Explanation based on fundamental hypothesis of three-phase theory[J]. Phys Rev E, 2012, 85:36110-36115.

Density Property of Traffic Flow based on Traffic Measurement

ZHU Hui-bing¹, GUO Li-min¹, ZHANG Ning-xi², GUO Ming-min³, FEI Li¹

(1.Faculty of Architectural Engineering, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

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

Abstract: The probability density characteristic of the vehicle density is investigated based on the empirical data obtained from the Yan'an Elevated Road of Shanghai and Jinshui Elevated Road of Zhengzhou, for the purpose of exploring the properties of traffic density. It is found that the probability densities of the vehicle density agree well with the Beta function by means of curve fitting. Taking the properties into account, the numerical simulation is carried out based on the NaSch model. The result is obtained in the form of the flux-density diagram. It is shown that the steady state of the congested traffic occupies a two-dimensional region in the flow-density plane, and is in much better agreement with the traffic measured data. In so doing, the probability density characteristic of the vehicle density is thus reconfirmed.

Key words: urban traffic; probability density; statistical analysis; vehicle density; beta distribution

(责任编辑 章踐立)