

文章编号: 0427-7104(2008)02-0147-06

基于快速路交通录像的交通流模型 参数测量方法研究

吴正, 朱辉, 贾楠

(复旦大学 力学与工程科学系, 上海 200433)

摘要: 提出一种利用城市快速道路交通录像资料测量交通流模型中各种参数的方法. 以北京市一个路段的实际录像资料为例, 通过测量和分析获得 Kerner 非线性模型中的临界密度、宽运动堵塞的传播速度和 Greenshields 模型中的畅行速度等参数. 结果显示, 这是一种操作性强、成本很低且有多种应用前景的交通流测量新方法.

关键词: 交通流模型; 测量; 临界密度; 宽运动堵塞; 畅行速度

中图分类号: O 39; U 491.112

文献标识码: A

交通流模型是描述交通流状态变量随时间空间变化、分布的规律及其与交通控制变量之间关系的方程式. 在交通流建模中, 常把模型分为采用流体力学模拟的宏观模型和采用车辆跟驰理论的微观模型两大类^[1]. 无论宏观模型还是微观模型, 在其建立过程和实际应用时, 都需要通过测量确定各种参数. 而测量的基本要求之一是可重复性, 即可以在接近相同的条件下重复进行大量的测量, 再将所获得的数据资料进行统计处理从而得到所需参数.

在传统的交通流测量中, 能够方便地直接获得的数据只有流量, 即交通量. 速度可以通过流动车测试法等方法获得^[2], 但重复测量比较困难; 如果通过道路监控装置测量速度, 则需要将单个车辆的速度换算成车流的平均速度. 至于交通流密度的测量, 除了航空遥感、卫星定点拍摄等成本很高的手段之外, 一般只能通过流量和速度换算.

在交通流的现代研究中, 不仅关注流量、速度和密度, 而且关注交通波的传播速度. 所谓的交通波, 既包括局部密度增大造成的拥堵向上游的传播, 也包括拥堵的消除而形成的疏散向上游的传播, 还包括从整体看是随着车流一起向下游移动的小范围高密度“扰动”现象. 德国物理学家 Kerner 根据实验观测, 提出了完全不同于传统交通流速密关系的二维速密关系模型, 以及一系列描述非线性复杂交通现象的概念^[3-7], 这些概念都与交通波的传播有密切联系. 但对交通波的传播行为和传播速度如何测量, 目前国内外交通工程界都还缺乏成熟的技术. 上世纪 90 年代, 我们曾针对低速混合型城市交通系统, 将平面交叉口信号灯视为扰动源, 由此得到拥堵波和疏散波的传播模型, 再同管道内活塞运动引起的气体流动过程建立比拟, 从而提出了交通波传播的测量方案, 获得了一些与交通流模型参数有关的实测数据和经验公式^[8-10]. 不过, 这一方法若应用到快速道路系统, 则由于不存在信号灯而仍难以实现测量重复性的要求.

近年来我国城市快速道路发展迅速, 交通管理手段的现代化也得到同步发展, 其中很重要的一个方面就是录像监控设备的广泛应用. 这些监控设备获取的大量信息资料, 是交通自动控制系统设计和运行的重要依据, 当然也应该成为交通流建模的基本出发点. 本文要研究的就是如何在这些录像信息资料和交通流模型之间建立联系, 针对城市快速路设计一种实用性较好的测量方法, 可以方便且较为准确地收集路面的各种模型参数.

收稿日期: 2006-11-06

作者简介: 吴正(1956—), 男, 副教授.

1 测量方法的设计

交通流的流量 Q 、密度 ρ 和速度 u 三者之间应满足如下关系:

$$u = Q / \rho \quad (1)$$

为了模拟快速路录像监控过程,我们采用数码摄像方式,在某一路段的上方,如过街天桥、高层建筑等处,对该路段交通流进行几十分钟至几小时连续拍摄.之后,通过 Windows movie maker 软件在电脑上进行图像格式转换及数据采集,具体做法是:固定画面,数出某一确定区域内的车辆数,即可获得密度数据;然后让录像逐帧步进,通过测量某一辆车经过路上已知长度(如分道线、两标志物之间等)所需时间,即可获得速度数据;最后再利用方程(1)得到流量数据.重复这一过程,就能通过一段录像资料采集到大量的“速度-密度”或“流量-密度”二维数据点.

之所以没有采用直接数出单位时间通过某截面车辆数的方法来测流量,是因为测量流量必须要有一段时间间隔,为了数据的准确性,间隔不能太短,但在这段时间内密度会发生明显的变化,因此测得的流量和密度数据之间同步性就可能降低.而采用上述方法,车辆通过分道线的时间很短,可以认为在这段时间内密度基本不变,同步性得到了较好保证.

本方法与交通工程传统的测量方法相比有许多优点.首先,测量的原始资料比较容易获得,实验的主要部分能在室内进行,这不仅改善了测量人员的工作条件,同时也提高了测量的可靠性.其次,数据收集过程比较简单,只需在电脑上数出车辆数及记录间隔时间即可,经过短期培训的普通工作人员都可以承担.最后,也是最重要的,这种方法获得的数据量相当大,能够从根本上保证满足测量的重复性要求.根据我们的实践,一根车道 40 min 的录像资料就可采集 50 多组数据,甚至比平面交叉口测量的效率更高.

根据以上方案,2006 年 1 月 26 日在北京市二环路阜成门桥上进行了第一次实际拍摄,3 月 23 日在上海市南北高架路东侧的长征医院住院大楼 12 楼进行了第二次拍摄,均取得了成功.本文下面以第一次拍摄所获部分数据为例展开分析讨论,该次拍摄的观测区域长 80 余米,单向四车道,我们拍摄了外侧的 3 根车道,其中最外侧车道有一上匝道口,如图 1 所示.图 2 给出了分不同车道的“速度-密度”、“流量-密度”二维数据点分布,其中(a),(b),(c)分别为第 1,2,3 车道上的“速度-密度”分布,(d),(e),(f)则为相应车道上的“流量-密度”分布.

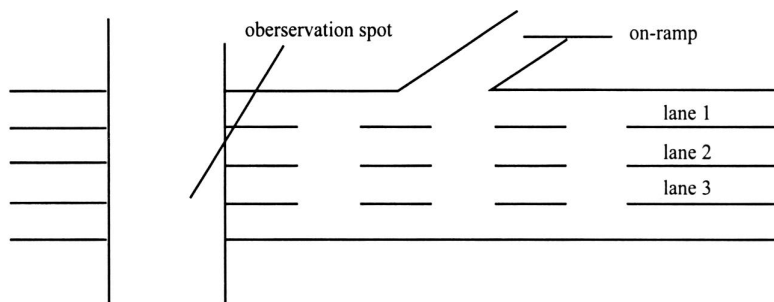


图 1 北京市二环路阜成门桥观测点示意图

Fig. 1 Measuring point of Erhuan Road of Beijing

2 Kerner 非线性模型中临界密度的测量结果

按照传统的交通流理论,流量-密度之间的函数关系可以用一条曲线表示.但 Kerner 指出,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 3),简化成低密度自由流阶段的一条曲线和中和、高密度拥挤流阶段的一个二维区域(图 4),在单一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,有时车辆可以以自由流的高速行驶,有时车辆只能以拥挤流的低速行驶.注意到这一部分范围的密度本身并不一定大,有时远未达到交通饱和,用传统的交通流理论无法解释,所以也被称为“幽灵式堵塞”.不难看出,图 2 与图 3 形态上是相当一致的.

把临界密度定义为交通流状态既可取自由流又可取拥挤流时所对应的最小密度,也就是图 4 中线段 AB 所对应的横坐标点. 当密度大于这一点,则速度不再呈现出与密度的线性关系. 通过电脑上读得的大量“流量-密度”数据对,能够计算出不同密度下流量的标准差. 当某一密度下标准差出现突然增大并且其后几个密度下的标准差也都保持较大数值时,说明这个密度之后交通流已呈现出强非线性特征,所以可以认为其就是临界密度. 表 1 ~ 表 3 分别给出了 3 根车道的临界密度计算结果.

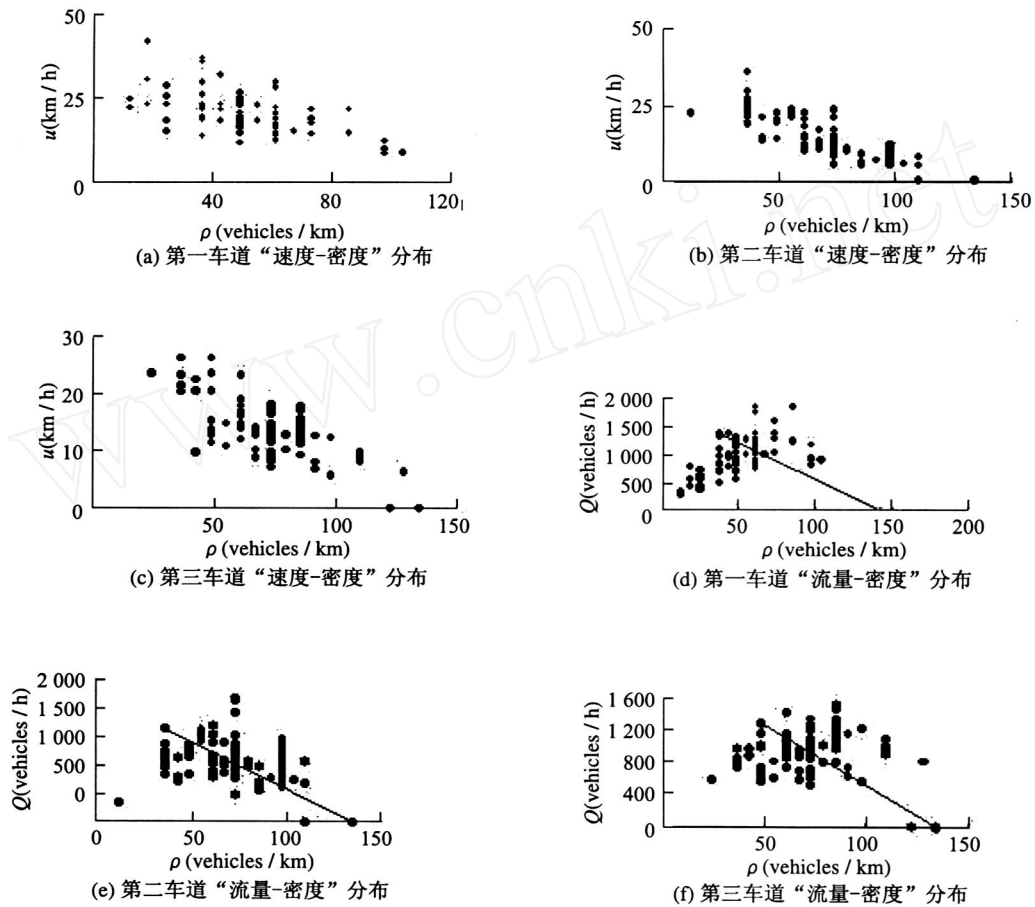


图 2 分车道“速度-密度”,“流量-密度”二维数据点分布图
Fig. 2 Measurement data of velocity-density and flow-density

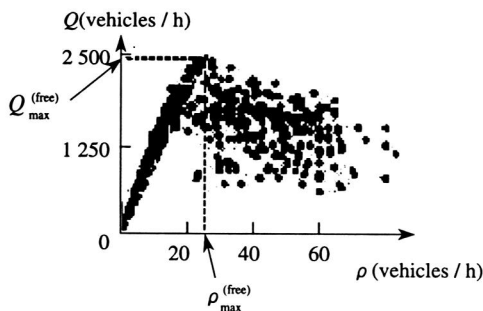


图 3 流量-密度实测数据
Fig. 3 Measurement data of flow-density

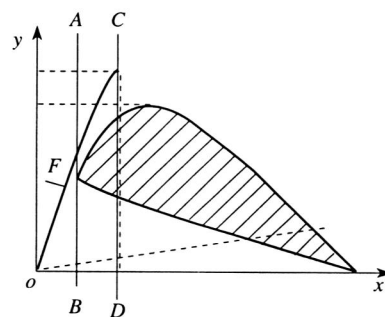


图 4 多车道流量-密度模型
Fig. 4 Multi-lane model of flow-density

表 1 车道 1 的临界密度计算结果

Tab. 1 Calculated result of the critical density in lane 1

密度 (veh/km)	流量标准差 (veh/h)	临界密度 (veh/km)
12.22	16.34	
18.34	144.39	
24.45	119.09	
36.67	253.46	36.67
42.79	220.76	
48.90	233.80	
55.01	115.70	
61.12	307.22	

表 2 车道 2 的临界密度计算结果

Tab. 2 Calculated result of the critical density in lane 2

密度 (veh/km)	流量标准差 (veh/h)	临界密度 (veh/km)
36.67	153.00	
42.79	147.50	
48.90	147.12	36.67
55.01	54.65	
61.12	233.44	

从上面 3 组数据可以看出,这样得到的临界密度值通常都是比较低的,尤其是与传统交通流模型所认为的拥挤流出现的高密度相比较而言.所以,这与 Kerner 给出的定义和实测数据一致,也就是说我们的方法能够得到 Kerner 模型中的临界密度值.

表 3 车道 3 的临界密度计算结果

Tab. 3 Calculated result of the critical density in lane 3

密度 (veh/km)	流量标准差 (veh/h)	临界密度 (veh/km)
36.67	76.52	
42.79	41.26	
48.90	246.87	
55.01	110.53	48.90
61.12	192.78	
67.24	138.65	
73.35	221.48	

3 宽运动堵塞的传播速度

Kerner 把“流量-密度”平面上呈现非线性的二维区域进行细分:从左上角自由流边界处的点到右下角完全拥堵的点之间连一条直线,将恰好落在此连线上的

点所对应的交通流状态称为宽运动堵塞状态,其余点所对应的称为同步流状态.在宽运动堵塞下,堵塞形成的区域以一个恒定速度向上游推进,即使遇到交通瓶颈、上下匝道等也不会改变推进速度.如果是同步流状态,则不具有宽运动堵塞恒定推进速度的特征,并且在遇到交通瓶颈、上下匝道干扰时很容易发生流动状态的改变.我们在上一节中已求得了临界密度,只要将该密度下的最大流量所对应的数据点与流量为 0 的堵塞密度数据点连一直线 $Q_c(\rho)$,即为宽运动堵塞线.

在不考虑源、汇的条件下,由车辆数守恒定律可知 Q 和 ρ 之间满足以下的方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

其中 t, x 分别为时间和空间位置坐标.将方程(2)变形可得

$$\frac{\partial}{\partial t} + \frac{dQ}{d\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0. \quad (3)$$

既然宽运动堵塞是一种固定的交通流状态在空间位置上的移动,其中密度是不改变的,即有

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{dx}{dt} = 0. \quad (4)$$

比较方程(3)和(4)可得

$$\frac{dQ}{d\rho} = \frac{dx}{dt} = -U_c, \quad (5)$$

这里 U_c 就是宽运动堵塞的传播速度,因为宽运动堵塞线的斜率 $\frac{dQ}{d\rho}$ 总是负数,所以取其相反数.图 5~图 7 分别给出了 3 根车道的宽运动堵塞线方程和传播速度计算结果.

在文献[4]中研究者所测得堵塞传播的速度为 12~18 km/h,文献[11]中通过数值模拟得到的结果为 9~24 km/h.而本文的结果则是 12.74,13.5 和 14.96 km/h,显示与原有的实测或计算结果都能有较好的吻合.

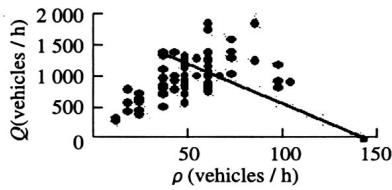


图 5 车道 1 堵塞线

Fig. 5 Wide moving jam line of lane 1

$$Q = -14.96\rho + 2011.9$$

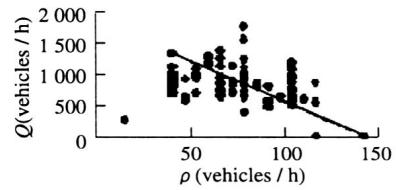


图 6 车道 2 堵塞线

Fig. 6 Wide moving jam line of lane 2

$$Q = -12.74\rho + 1821.2$$

4 Greenshields 模型中畅行速度的测量结果

为了适定求解方程(2),需要补充一个微分方程或代数方程,最简单的就是补充一个线性代数方程:

$$u = u_f \left(1 - \frac{\rho}{\rho_j} \right) \quad (6)$$

这就是 Greenshields 模型^[2],其中 ρ_j 为阻塞密度, u_f 为畅行速度。

畅行速度,也就是在道路工程学的意义下车流能达到的最大速度,通常根据道路等级、几何线形、管制措施等条件确定。本文提出一种畅行速度值的测量方案如下:在图 2 中,“速度-密度”数据点散布在一个二维区域内,选取位于这个二维区域上边界的数据点,用最小二乘法与方程(6)进行拟合,所得直线在 u 轴上的截距即是畅行速度。表 4~表 6 分别给出了 3 根车道的畅行速度拟合结果。

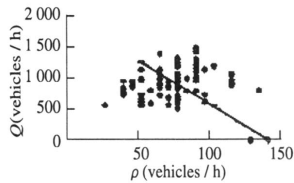


图 7 车道 3 堵塞线

Fig. 7 Wide moving jam line of lane 3

$$Q = -13.5\rho + 1815.4$$

表 4 车道 1 的畅行速度拟合结果

Tab. 4 Fitting of the free velocity in lane 1

u (km/h)	(veh/km)	u_f (km/h)
30.00	36.67	
23.61	55.01	
24.00	73.35	41.54
12.00	97.80	
7.91	110.02	

表 5 车道 2 的畅行速度拟合结果

Tab. 5 Fitting of the free velocity in lane 2

u (km/h)	(veh/km)	u_f (km/h)
42.35	18.34	
36.92	36.67	
32.00	42.79	
28.24	61.12	49.92
21.49	73.35	
21.49	85.57	
11.90	97.80	
8.62	103.91	

表 6 车道 3 的畅行速度拟合结果

Tab. 6 Fitting of the free velocity in lane 3

u (km/h)	(veh/km)	u_f (km/h)
26.18	36.67	
26.18	48.90	
23.23	61.12	
18.23	73.35	36.51
17.78	85.57	
12.41	97.80	
9.86	110.02	
6.34	128.36	

5 结语与展望

在国内交通工程界,虽然也针对城市快速路开展了一些理论研究,但所得结果往往较少实验支持,而在快速路的交通流数据测量及处理方法方面一直鲜有进展,大量宝贵的实际交通监控录像资料没有得到充分应用。本文所述实验数据获取方法,将为交通工程的基础理论研究开辟一个新领域,对这种研究会有促进作用。而本文所得结论,如堵塞传播的速度等,不仅从实验上支持了原有理论,而且还可在红绿灯配

时、交通引导等多方面有实际应用意义. 必须指出, 交通系统是一个复杂的巨系统, 影响因素很多, 在不同国家测得的数据可能会有一些差别, 因此, 在我国开展复杂交通现象的测量方法研究并用以指导交通工程实践是十分必要的.

参考文献:

- [1] 宫晓燕, 汤淑明, 王知学, 等. 高速公路交通流建模综述[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2:74-79.
- [2] 王建军, 严宝杰. 交通调查与分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [3] Kerner B S, Konhauser P. Cluster effect in initially homogeneous traffic flow[J]. *Phys Rev E*, 1993, 48:2335-2338.
- [4] Kerner B S, Rehborn H. Experimental features and characteristics of traffic jams[J]. *Phys Rev E*, 1996, 53:1297-1300.
- [5] Kerner B S. Experimental features of self-organization in traffic flow[J]. *Phys Rev Lett*, 1998, 81:3797-3800.
- [6] Kerner B S. Experimental features of the emergence of moving jams in free traffic flow[J]. *J Phys A*, 2000, 33:221-228.
- [7] Kerner B S. Synchronized flow as a new traffic phase and related problems for traffic flow modeling[J]. *Math and Comp Modeling*, 2002, 35:481-508.
- [8] 吴 正. 交通流的动力学模拟与测量方法[J]. 复旦学报(自然科学版), 1991, 30(1):111-117.
- [9] 吴 正. 低速混合型城市交通的流体力学模型[J]. 力学学报, 1994, 26:149-157.
- [10] 吴 正. 关于交通流动力学模型与交通状态指数研究[J]. 水动力学研究与进展 A, 2003, 18:403-407.
- [11] 汪茂林, 吴 正. 高速公路交通事故和干涉车流波的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展 A, 2001, 16:265-273.

Measuring Method Study of the Traffic Flow Model Parameters Based on Video Recording of Expressway Traffic

WU Zheng, ZHU Hui, JIA Nan

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

Abstract: A method is proposed to measure the various parameters of traffic flow models applying video tape information of urban expressway traffic. A practical example is based on some video data got from a section of a highway of Beijing. Through measurement and analysis the critical density of Kerner's non-linear model, the propagation speed of the wide moving jam and the unimpeded velocity of Greenshields's model are obtained. The results show that the new method is serviceable, low-priced and widely useful to traffic flow measuring.

Keywords: traffic flow model; measurement; critical density; wide moving jam; unimpeded velocity