

# 国内几条城际高速道路交通流实测

郭明旻<sup>1)\*</sup> 尹凯弘<sup>1)</sup> 吴正<sup>1)</sup> 许谦<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> (复旦大学力学与工程科学系, 上海 200433) <sup>2)</sup> (嘉兴广播电视大学, 浙江嘉兴 314000)

\*联系人, E-mail: [mmguo@fudan.edu.cn](mailto:mmguo@fudan.edu.cn)

国家自然科学基金资助项目 (批准号: 11002035)

中央高校基本科研业务费资助项目 (批准号: 20520133061)

**摘要:** 本文采用改进的视频数据采集方法, 对中国四条具有不同特征的城际高速公路拍摄实况交通录像, 得到 10 万多组车辆即时位置、速度等数据。发现由于高比例货车的存在, 速度分布一般呈现双峰特征。提出组合双曲正割函数概率密度形式, 成功地对实际数据进行了拟合。发现车头时距一般服从对数正态分布, 其中存在 5% 左右车头时距小于 1 秒的高速跟驰数据, 并将其分为主动高速跟驰和由于换道引起的被动高速跟驰两类。高速跟驰使得平均密度和平均流量增大, 同时还会诱发更多换道行为。通过实测数据构造“流量-密度”时间序列, 再通过不同时间长度的平均画出不同的“流量-密度”基本图, 发现城际高速公路基本图一般具有线性自由流特征, 形态具有与时间无关性。由于高速跟驰现象, 使得短间隔基本图中密度和流量的最大值有所增大, 和 Kerner 的基本图定性一致, 定量存在差异。将实测数据转换为车辆轨迹线, 应用于拥堵形成及释放过程的研究, 结果显示当下游某处发生事故而需要封闭部分车道时, 为了保证事故路段的交通安全, 路障应当设置在上游较远的位置。

**关键词:** 交通工程; 视频检测; 城际高速道路

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

在交通流模型研究的历史中, 很多重要理论成果都基于实际测量数据。与此相应, 交通流数据的采集方法也经历着不断发展的过程: 从早期的定点记录流量、跟车测速、浮动车测速等方法, 到上世纪 80 年代以后, 环形线圈检测器、微波检测器、超声波检测器、视频检测装置等许多新技术新设备, 被成功应用于检测道路的车流量、车型、车速、占有率等数据。在这些数据采集方法中, 视频检测方法具有独特的优势, 它能够完整记录所拍摄的整个路段在一段时间内各个瞬间的交通状态, 从而在微观交通流数据和宏观交通现象之间架起桥梁, 有利于深刻理解数据所反映的事实真相及其背后的机理。国际上几位知名交通流研究者都指出<sup>[1,2]</sup>: 在目前的交通流研究中, 需要更多和更详细的基于交通录像的微观交通流实验数据, 才能建立准确而全面描述交通流动力学特征的数学模型。

从交通流视频检测的发展历史看, 早期的研究<sup>[3-7]</sup>主要着眼于提取视频中运动的车辆对象, 利用视频图像序列进行车辆检测和交通事件监测, 包括背景提取、背景更新、目标分割、目标跟踪、阴影去除等技术难点。国外的主流产品如法国的

Citilog、美国的 Autoscope 和比利时的 Traficon 等已经得到许多实际应用。近年来，美国联邦公路管理局（FHWA）实施的 NGSIM（The Next Generation Simulation Program）项目<sup>[8]</sup>，把主要目标转向从视频检测中得到车辆轨迹信息，NGSIM 轨迹数据在跟驰模型（客-客，客-货，货-客，货-货）<sup>[9-11]</sup>、车辆换道问题<sup>[12-14]</sup>、“流量-密度”基本图<sup>[15,16]</sup>等重要热点问题的研究中发挥了重要作用。此外还有利用直升机从高空定点拍摄的视频中研究跟驰行为的各向异性以及客车与货车行为差异等<sup>[17]</sup>。这些研究都显示出视频检测方法采集数据的优势。

城际高速公路是城市间联系的纽带之一，承担了大量人流、物流运输的任务，在整个交通网络系统中发挥着重要作用。由于城际高速公路存在着较高的货车比例，其交通流特征与城市快速路以及非快速道路有较大差异，而且在城际高速公路接近城市的路段（本文以下简称近城段）和远离城市的路段（远城段）也有各自不同特征，而国内外关于高比例货车条件下的交通流模型研究相对还比较少。因此，有必要针对城际高速公路的不同路段开展与高比例货车相关的交通流问题研究。NGSIM 项目采用 7 台摄像机同时从不同角度拍摄一个路段，并且把摄像机架设在上百米的高层建筑里作自上而下接近垂直的拍摄，以保证视频上车辆之间基本没有相互遮挡，也将由于车身高度造成的投影误差控制在极小范围<sup>[8]</sup>。但是这种拍摄方式很难在周围几十米内都不允许建造高层建筑的城市高速公路，尤其是远城段应用。

我们课题组从 2008 年起，也提出了一种基于视频检测的交通流数据采集方法<sup>[18,19]</sup>，在中国几个典型城市的快速路上拍摄了数百小时具有不同特征的交通录像，以从中采集的“车头间距-车速”数据对为出发点，分析不同路况的交通特点以及驾驶员行为对交通的影响<sup>[20-25]</sup>。本文进一步将该测量方法改进、应用于城际高速公路，对四条具有一定代表性的城际高速道路交通流进行录像拍摄，从中采集车辆位置、车速、密度、流量、加速度、换道车辆数等多种信息并进行统计分析，特别关注了客车和货车的不同行为特征，希望为建立有实际应用价值的城际高速道路交通流模型和确定其中一些关键参数提供定量的依据。

本文组织结构如下：第 1 节介绍录像拍摄和从视频中提取数据的方法以及获得的数据；第 2、3、4 节分别从车速分布、车头时距、“流量-密度”基本图等三个角度对所获数据展开统计分析；第 5 节用车辆轨迹信息研究一个车辆抛锚引发局部拥堵的例子；第 6 节给出全文的总结和展望。

## 1 视频拍摄、数据提取方法和获得的数据

在城市快速路研究中，我们采用在某一路段上方某个固定位置（如过街天桥）架设摄像机，对该路段交通流进行长时间连续拍摄的基本模式<sup>[18,19]</sup>。与 NGSIM 项

目不同，我们对每个路段仅采用 1 台摄像机拍摄，视频中有效的数据提取范围一般仅 100 米左右，并且存在一定的车辆相互遮挡和车身阴影等情况。但这种拍摄方法有两个优点：一是和一般交通录像监控设备形式很接近，相关检测系统有可能发展成在线检测并为智能交通系统应用服务；二是拍摄场地要求很低，尤其能够在一些周围没有高层建筑的城际高速路段实施。本文仍采用这一方式，从 2011 年起对四条具有一定代表性的城际高速路段总共拍摄了 100 余小时交通流实况录像，其中 G2 和 G60 双向各四车道，G15w 和 G45 双向各二车道；G2 和 G45 拍摄点在近城段，G15w 和 G60 拍摄点在远城段。图 1 给出了四个拍摄点的位置和录像截图。



图 1 录像拍摄示意图（G2 京沪高速上海江桥收费站西侧；G15w 常台高速嘉兴象贤大桥；G45 京承高速北京芍药居车站北侧；G60 沪昆高速嘉兴王店休息区南侧）

Figure 1 Video clips from the four shooting locations

为了提取交通数据，要通过视频播放软件将所拍摄的录像截取成逐个排列的图形文件。这里比较关键的问题是截取画面的频率取多大，也就是间隔多长时间截取出一幅画面？NGSIM 中的数据一般都是间隔 0.1 秒，我们则采用了 0.5 秒和 1.0 秒两种不同的时间间隔（表 1）。如果假定对画面上车辆位置确定的误差不可能小于某一阈值，那么时间间隔越小，则通过连续两幅画面上车辆位置的变化而测得的速度误差反而越大。取 1.0 秒时间间隔，只要车辆位置的误差不超过 0.8 米，就能保证测速误差不出交通工程中通常允许的 3 公里/小时；而取 0.1 秒时间间隔，同样的误差允许条件，就需要定位精度达到 0.08 米才能够保证。

得到截图序列之后，接下去要确定的是从中直接采集什么数据以及如何采集。在城市快速路测量中<sup>[21]</sup>，我们以“速度-车头间距”（v/h）数据对作为直接的采集对



## 2 车速分布与统计分析

由于高比例货车的存在，城际高速公路交通流速度分布呈现出显著不同于城市快速路的双峰特征，对具有这种特征的速度概率密度分布函数之前研究比较少，本节将以表 1 中全部分车种提取的 G15w 和 G60 三个样本实测速度数据为例，对这一问题展开研究。这三个样本一共有 22691 个数据，其中同一辆车可能连续出现在几幅截图上，测得的速度会具有一定差异，未做平均处理。图 2 是相应的概率密度分布曲线，横坐标为车速(m/s)，纵坐标为概率密度。

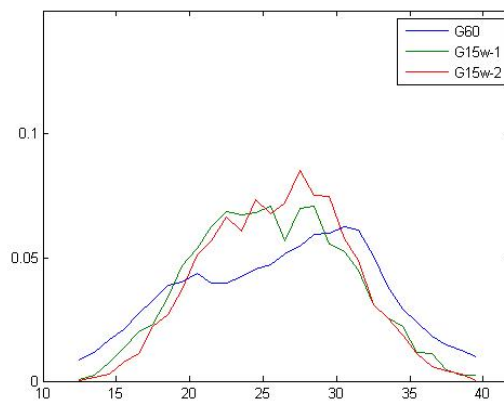


图 2 车速的概率密度分布曲线

Figure 2 Probability density distribution of vehicle velocity

从图 2 中可以看到，无论是四车道的 G60，还是二车道的 G15w，后者还包括普通工作日（G15w-1）和双休日（G15w-2）两种不同情况，实测得到的总体车速概率密度曲线都具有两个峰的特征。这与城市快速路得到的结论<sup>[21]</sup>具有明显不同：城市快速路同一路段测得的总体车速数据都具有单一峰值，其概率密度能接受正态分布（非负部分）假设。究其原因，是因为高比例货车的存在，其车辆性能和承担功能与客车有显著不同，在高速公路上的行为也会有显著差异。以 G60 的样本为例，总共 17002 个实测数据，客车和货车分别有 10695 个和 6307 个，它们的平均速度分别为 29.77m/s 和 20.44m/s，差异非常明显。进一步从两个车种分别的数据中可以看到，它们各自的概率密度曲线（图 3）都具有明显的单峰形态，与城市快速路很接近，仍然可以接受正态分布假设。但当把它们合并统计时，则出现了双峰特征。

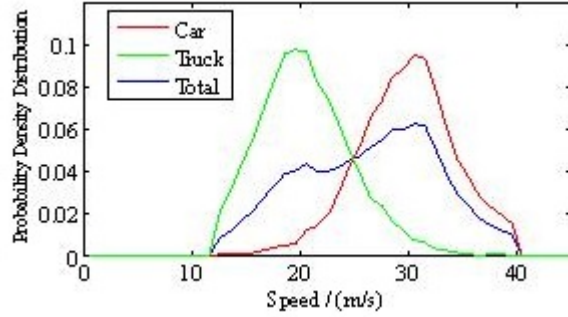


图3 G60分车种车速概率密度分布曲线

Figure 3 Probability density distribution of different vehicle classes on G60

因此，有必要研究能够刻画这种双峰特征的概率密度函数，不但要有两个可以变化位置的峰值，而且两个峰值的高度、方差也都需要根据具体问题进行调节。蒋仁言<sup>[26]</sup>曾提出过如下形式可有双峰形状的概率密度函数：

$$f(x) = \frac{(x - \mu_1)^2 + a^2}{\sqrt{2\pi\beta[\beta^2 + (\mu_2 - \mu_1)^2 + a^2]}} e^{-\frac{(x - \mu_2)^2}{2\beta^2}}, \quad -\infty < x < \infty \quad (1)$$

其中含有 $a^2$ 、 $\mu_1$ 、 $\mu_2$ 和 $\beta$ 四个可调节的参数，在这些参数满足一定条件时能够出现双峰形状。我们认为(1)式中参数的实际意义不够明确，在实际使用中参数优化的困难比较大，所以提出新的概率密度函数形式如下：

$$f(x) = \frac{1}{\pi} \{ \alpha k_1 \operatorname{sech}[k_1(x - x_1)] + (1 - \alpha) k_2 \operatorname{sech}[k_2(x - x_2)] \}, \quad -\infty < x < \infty \quad (2)$$

其中包含五个自由参数： $\alpha$ 、 $k_1$ 、 $k_2$ 、 $x_1$ 和 $x_2$ 。 $x_1$ 和 $x_2$ 主要由两个峰值的位置所决定，其他三个参数则与峰值的高度、方差等有关， $\alpha \in [0, 1]$ ， $k_{1,2} > 0$ 。

根据(2)式，显然有 $f(x) > 0$ ，并且满足：

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1 \quad (3)$$

又有 $\int_{-\infty}^{\infty} x \cdot \operatorname{sech}(kx) dx = 0$ ，所以(2)式的数学期望为：

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot f(x) dx = \frac{1}{\pi} \left[ \alpha k_1 \frac{\pi}{k_1} x_1 + (1 - \alpha) k_2 \frac{\pi}{k_2} x_2 \right] = \alpha x_1 + (1 - \alpha) x_2 \quad (4)$$

其物理意义很明确：如果 $x_1$ 和 $x_2$ 分别表示客车和货车平均速度，并且客车比例为 $\alpha$ ，那么 $\mu$ 就表示合并后车流的平均速度。

在(2)式中，需要确定的参数一共有 $\alpha$ 、 $k_1$ 、 $k_2$ 、 $x_1$ 和 $x_2$ 五个。为了进行参数优化，首先把样本数据的速度范围划分成 $N$ 个等距的区间，将各个速度区间中值和相对应的数据频率分别记为 $x_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 和 $f_i (i = 1, 2, \dots, N)$ ，然后根据(2)式计算得到

相应的  $f(x_i)$ 。于是就能构造如下形式的泛函：

$$J(\alpha, k_1, k_2, x_1, x_2) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{f_i}{f(x_i)} - 1 \right]^2 \quad (5)$$

优化的目标是在参数  $\alpha$ 、 $k_1$ 、 $k_2$ 、 $x_1$  和  $x_2$  构成的五维空间的某个合理子空间内，找到一个点  $\{\alpha^*, k_1^*, k_2^*, x_1^*, x_2^*\}$ ，使得  $J(\alpha^*, k_1^*, k_2^*, x_1^*, x_2^*)$  达到最小值。

在本节三个样本中，参数合理取值范围是：

$$\{\alpha, k_1, k_2, x_1, x_2\} \in \{[0, 1], [0, 1], [0, 1], [12, 40], [12, 40]\} \quad (6)$$

优化结果为：

$$\{\alpha^*, k_1^*, k_2^*, x_1^*, x_2^*\}_1 = \{0.313, 0.316, 0.257, 19.34, 29.62\} \quad (7)$$

$$\{\alpha^*, k_1^*, k_2^*, x_1^*, x_2^*\}_2 = \{0.526, 0.380, 0.378, 22.09, 29.36\} \quad (8)$$

$$\{\alpha^*, k_1^*, k_2^*, x_1^*, x_2^*\}_3 = \{0.342, 0.522, 0.400, 21.43, 28.40\} \quad (9)$$

式中下标 1、2、3 分别表示 G60、G15w-1、G15w-2 三个样本。从结果看，四车道的 G60 路段，两个峰值之间距离比二车道的 G15w 更大；而双休日的 G15w-2 样本，两个  $k$  值，尤其是表征货车数据集中程度的  $k_1$  值，也比普通工作日要大。图 4 给出了三个样本参数优化后的拟合结果，其中蓝色曲线为实测数据，绿色曲线为拟合数据，可以看出两者都是很接近的。

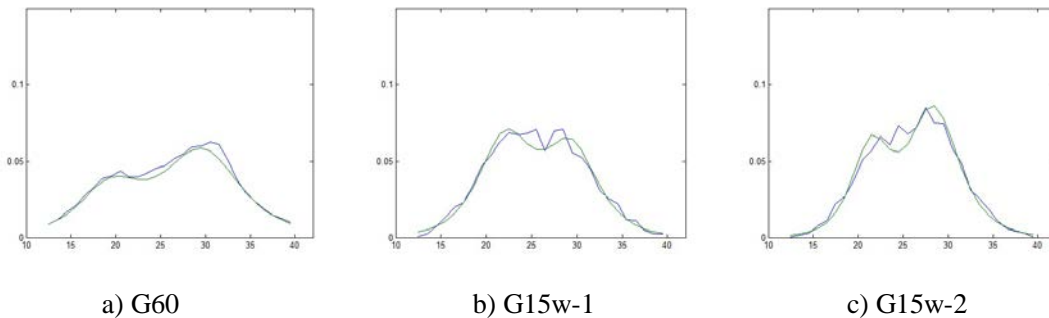


图 4 概率密度函数参数优化后拟合结果

Figure 4 Fitting curves of the probability density distribution with parameter optimization

### 3 车头时距分布与高速跟驰现象

车头时距指的是同一车道连续两辆车先后到达某一指定位置的时间差，它的倒数也就等于单车道流量，具有重要意义。将  $v/d$  方法测量中得到的每辆车最后一次速度值及相应车头位置数据提取出来，并假定在此位置之后该车不再加速或减速，就可以确定这辆车到达画面出口端的时间，它与前面一辆车的到达时间之差就是车

头时距,通过这一方法本文获得大量车头时距实测数据。本节以 G2 的一个样本(2012 年 6 月 6 日上午) 为例,对车头时距这一变量展开研究。

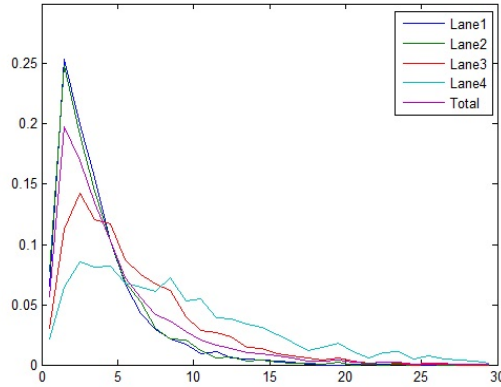


图 5 车头时距的概率密度分布曲线

Figure 5 Probability density distribution of time headway

这一样本总共采集到 10597 个车头时距数据。其中大于 30 秒的数据 21 个, 占比 0.2% 不到, 属于个别特殊情形, 故未列入统计。其余 10576 个数据中, 按行车方向从左到右四根车道依次为 3499、3471、2202、1404 个, 车头时距的平均值依次为 3.73、3.75、5.90、8.76 (秒), 总体平均车头时距为 4.86 秒。图 5 给出了车头时距的概率密度分布曲线, 它与城市快速路车头间距的概率密度分布曲线<sup>[21]</sup>很相似, 通过 Kolmogorov-Smirnov 拟合优度方法进行假设检验, 结果显示车头时距这一变量近似服从对数正态分布。

在城市快速路交通流测量研究中, 我们注意到存在着一种整体交通通畅条件下的“时密时疏”现象, 其中那些“密”的车辆被定义为“高速跟驰”<sup>[21]</sup>, 这一观点很快受到了国内同行的关注<sup>[27]</sup>。从车头时距的角度来看, 高速跟驰也就是小车头时距, 国外文献已有关于小车头时距的一些报道<sup>[28,9]</sup>。在本节的样本中我们看到, 如果用车头时距不超过 1 秒作为高速跟驰的标准, 那么总共有 594 个数据, 占数据总量的 5.62%。这种比例在另外几个样本中也都可以类似得到, 它们在定性和定量上都与城市快速路一致, 也与国外文献报道一致。进一步分车道统计, 四根车道高速跟驰数据依次为 228、270、66、30 个, 占比依次为 6.52%、7.78%、3.00%、2.14%, 说明随着车道从快到慢, 高速跟驰的比例逐步下降。



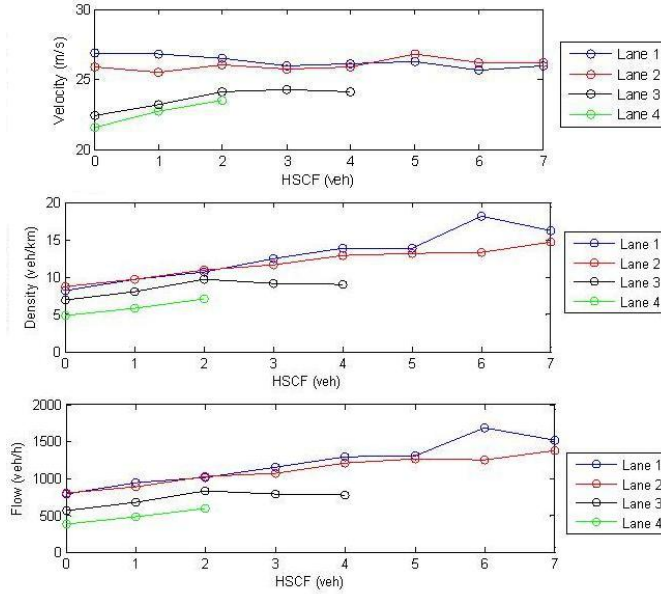


图 6 高速跟驰对交通流参数的影响

Figure 6 Effects of HSCF on traffic paramters

高速跟驰本质上是驾驶员的个人行为，具有个别性、随机性。但是由于这种个人行为在我国现实交通中相当普遍存在，其比例大小对宏观交通流参数就会产生不同的影响，所以有必要研究这种影响的规律。图 6 用本节样本数据按时间排序后进行一分钟平均，根据一分钟内高速跟驰车辆的数量（HSCF）分组统计平均速度、平均密度、平均流量等宏观交通流指标。从图 6 中可以看出，随着高速跟驰车辆数的增加，所有车道的平均密度、平均流量都有相应增大的趋势，这与高速跟驰定义相符。比较有趣的是，随着高速跟驰车辆数的增加，3、4 车道的平均速度也有增大的趋势，而 1、2 两根快车道的平均速度基本没有变化，甚至还略有下降。因为高速跟驰主要发生在更加畅通的 1、2 车道，所以它的主要影响应该是使得平均密度和平均流量有所增大，平均速度则基本不变或略有下降，反映在“流量-密度”基本图的自由流部分顶端，使得这一顶端向右上方延伸。



a) 主动性高速跟驰

b) 被动性高速跟驰

图 7 高速跟驰的两种类型

Figure 7 Two types of HSCF

高速跟驰可以分为两种类型：一是后车一直主动贴近前车高速行驶，如图 7(a)所示，红圈中车辆速度约为 115 公里/小时，与前车的车头时距不到 0.7 秒，保持高速跟驰的状态；二是因为超车和换道造成的后车被动高速跟驰，如图 7(b)所示，红圈中右侧车道的车辆向左侧变道，超越后车，而此时后车的速度也高达 115 公里/小时，并且没有采取减速措施，与前车的车头时距甚至还不到 0.4 秒。



图 8 高速跟驰诱发换道

Figure 8 Lane-changing induced by HSCF

高速跟驰不仅可能是换道超车的结果，它也经常是后者的原因，由于驾驶自由受到限制而诱发后车采取换道操作，如图 8 所示。红圈中的车辆速度约为 105 公里/小时，与前车的车头时距在 0.5 秒左右，它在高速跟驰一段距离之后从车道 1 换到车道 2 以追求更加快速行驶。结论很明显，高速跟驰是一种危险的驾驶行为，无论从小车头时距角度看，或者从可能增加换道行为角度看，都是如此。

#### 4 “流量-密度”基本图分析

本文测量速度时记录下每帧截图上全部车辆数，直接就得到了该瞬时路段上准确的车流密度。将该瞬时能够测到速度的所有车辆的速度求算术平均得到平均速度，乘以密度就得到 Wardrop<sup>[29]</sup>所定义的流量。每一时刻得到这样一对“流量-密度”数据，它们构成了数据的时间序列，通过不同时间长度的平均又能得到各种不同子序列，并画出不同的“流量-密度”基本图。本节仍以 2012 年 6 月 6 日上午 G2 的实测数据为基础，展开“流量-密度”基本图的研究。

图 9 给出了该路段这个上午全部数据相应的基本图，其中 1 秒即为截频时间(密度按实测车辆数计算，所以为离散值)，然后按 5 秒、10 秒、15 秒、30 秒和 60 秒平均，得到 6 个不同图形。不难看出，Kerner 在提出“三相交通流”理论时所依据的德国 A5 公路上环形线圈实测数据<sup>[30]</sup>，其中自由流部分“流量-密度”基本图与此十分相像。我们在城市快速路实测数据中曾发现<sup>[21]</sup>，可能存在三种不同类型的“流量-密度”基本图，其中第一种类型与此也十分相像。因为这一个上午该路段一直处于畅通状态(本文所研究的 9 个样本除极个别时段外都具有这种特征，这是城际高速公路不同于城市快速路之处)，所以这个结果是合理的。图 10 则给出了 1 车道数

据相应的基本图（Kerner 用的也是左侧车道数据），除了 5 秒平均时密度数据仍呈现离散之外，其他都和图 9 相似。

在图 9 中，从 1 秒到 60 秒，随着时间长度改变，“流量-密度”基本图大致上保持着相同的线性自由流形态，这是一个值得注意的结论。因为 Kerner 的实测时间间隔基本为 1 分钟，我们（包括城市快速路）则在 1 秒钟左右，两者之间存在显著时间差异。所以只有说明这种基本图形态具有与时间无关性，才能够进行比较研究。

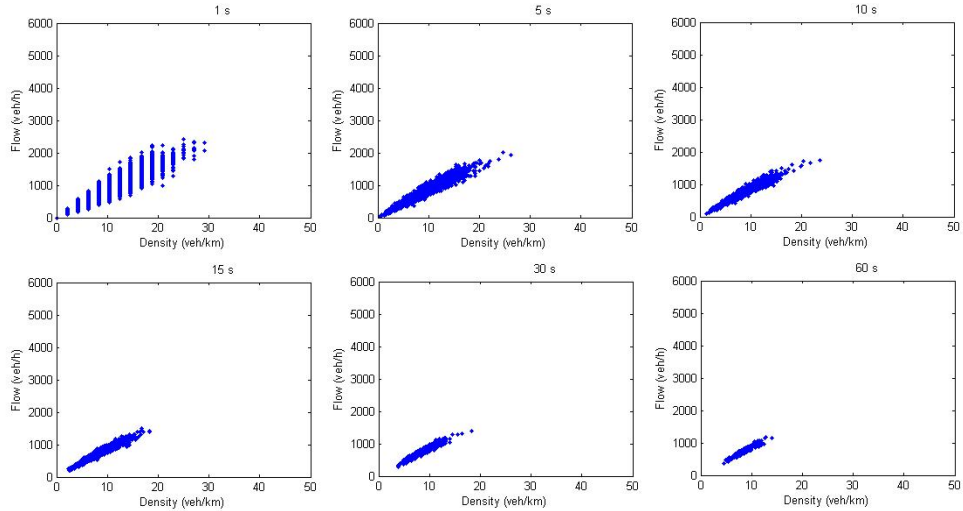


图 9 G2 流量-密度基本图

Figure 9 Fundamental diagram of G2

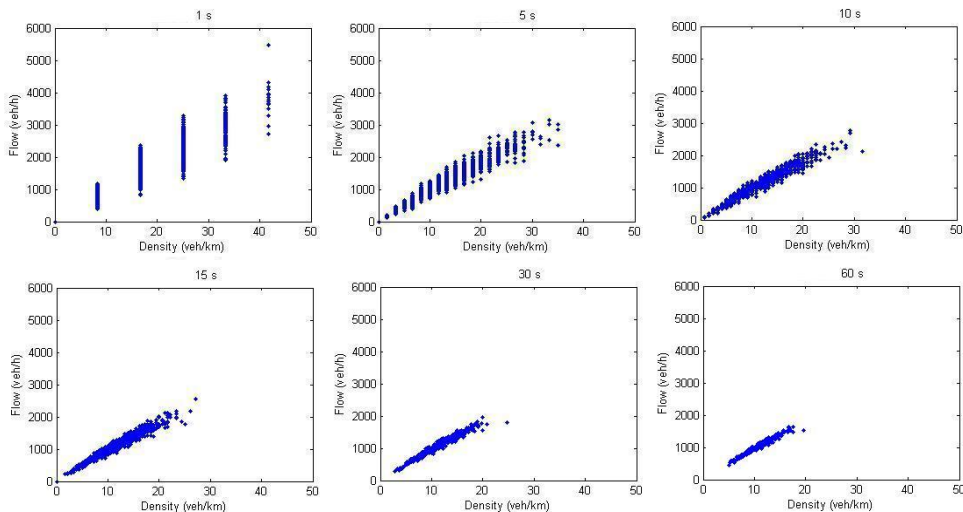


图 10 1 车道流量-密度基本图

Figure 10 Fundamental diagram of Lane 1

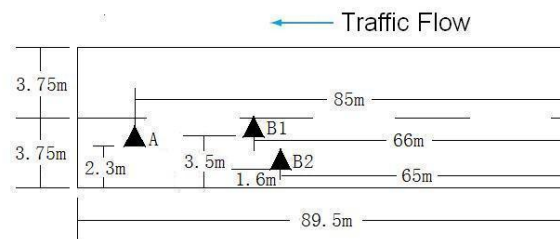
随着时间长度改变，“流量-密度”基本图在保持形态基本不变的同时，具体图形有一定变化。首先是密度取值从离散变为连续，同一个密度值所对应的流量范围从大变小，整个图形的线性化特征变得更加明显，所以 Kerner 在“三相交通流”模型中才能将自由流部分简化为一条曲线。其次是整个图形收缩了，或者说密度和流量的最大值都减小了。在 Kerner 的 1 分钟实测数据中<sup>[30]</sup>，最大流量不超过 2500veh/h/lane，相应的自由流部分最大密度不超过 25veh/km/lane。同样是左侧车道，我们在图 10 中得到的 1 秒实测最大流量超过 4000veh/h/lane，最大密度超过 40veh/km/lane，经过 15 秒以上时间平均后才跟 Kerner 的结果定量相符。换句话说，正是由于上一节讨论的高速跟驰现象，使得短间隔的基本图中密度和流量的最大值都增大了，它们和相对长间隔的 Kerner 的基本图定性一致，定量上则存在差异。

### 5 一个车辆抛锚引发局部拥堵的例子

我们在拍摄 G45 交通录像时，遇到了一次由于一辆车抛锚而引起这条二车道路段交通拥堵的实例，发生在 2012 年 9 月 14 日中午 11:59 到 12:15 这 16 分钟时间里。从我们所拍的录像中可以看到整个过程：事故发生约 2 分钟之后，交警来到现场，首先在距离事故点（图 11(a)下方，画面之外）比较近的位置放置了一个路障（图 11(b)中三角形 A）；约 5 分钟之后，因为限行效果不够明显，又在更远的地方放置两个路障（图 11(b)中三角形 B1 和 B2）；再过 6 分钟后牵引车把抛锚车拖走，路障撤除，但路段继续拥堵约 3 分钟之后才逐渐恢复畅通。在本节中我们尝试将获得的视频测量数据转换成类似于 NGSIM 的车辆轨迹，并探讨如何在这样一个交通事故引发拥堵再恢复畅通的过程中应用轨迹线进行研究。



a) 录像截图



b) 路段示意图

图 11 G45 车辆抛锚引发交通拥堵

Figure 11 Traffic jam caused by a vehicle broke down on G45

图 11(b)中的矩形区域是我们的数据提取范围，与图 11(a)中绿线所围斜方框相对应，车流自北向南。在图 11(a)中，这一范围的上游是一个出口匝道，右侧的建筑物是芍药居地铁站，三个路障则用红色三角形表示。采用本文视频检测方法，时间间隔 1 秒，在 16 分钟录像中得到车辆位置数据 4412 个，速度数据 3903 个，车头间距数据 2849 个，平均车速 25.38 公里/小时，平均车头间距 15.81 米。很明显，这些平均值与前面几节讨论的城际高速道路相比要小得多，即使与城市快速路<sup>[21]</sup>的大部分情况相比也是小的，说明车辆抛锚确实引发了这条二车道路段交通拥堵。

图 12 是根据从视频中采集到的车辆即时位置信息画出的轨迹图，横坐标为时间，单位是秒，纵坐标为图 11(b)中矩形区域右边起算的距离，单位是米，不同的蓝色斜线代表不同的车辆。图 12(a)中，绿色直线代表路障 A，可以看到其放置后 1 车道车辆明显减少，但几分钟后由于上游来流增多，不少车辆仍在 1 车道行驶，直到相当接近事故发生位置时才换道，说明这一限行措施效果不明显；红色直线代表路障 B1 和 B2，其放置后在上游 60 多米范围内 1 车道基本没有车辆（蓝色斜线基本不出现），限行措施取得效果，为事故排除和避免发生新事故提供了保证。图 13 显示了路障 A 已放置，但路障 B1 和 B2 还没有放置这个时间段的典型路况，有许多车辆正在尝试从 1 车道插入 2 车道，这是一种非常容易引发新事故的危险情景。

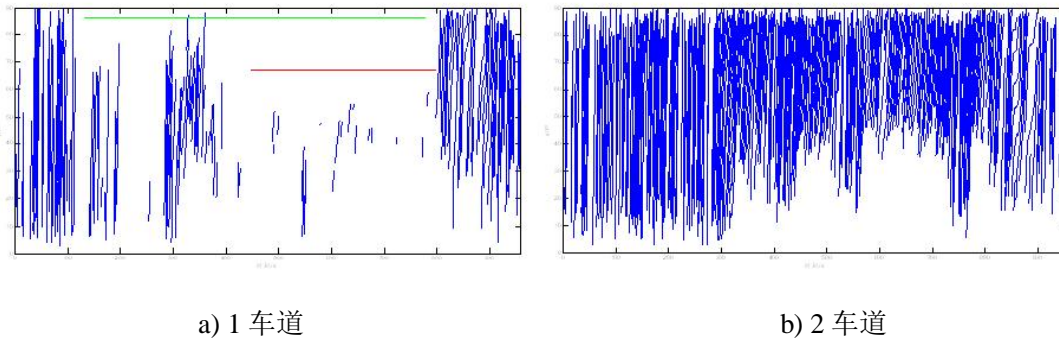


图 12 G45 交通事故阶段车辆轨迹线

Figure 12 Vehicle trajectories on G45 during an accident



图 13 第一个路障放置后的情景

Figure 13 Senario after the first roadblock was placed

由于第二组路障放置后一段时间 2 车道非常拥挤，视频上车辆相互遮挡严重，较远处的车辆位置无法准确确定，所以图 12(b)中部分轨迹线是从路段中间开始画的。到事故排除，路障撤除后，两根车道恢复通车，轨迹线也开始变得稀疏一些，能够从路段上游开始画。不过，在这最后几分钟里，两根车道都有几条轨迹线是折线而非斜线，说明这些车辆在路段中曾发生过降速甚至滞留，这是事故后恢复阶段的典型特征，到完全恢复畅通后不再出现。

通过图 12 并结合视频资料验证，发现可以将整个 16 分钟时间分为一段通畅和三段拥堵：通畅段是第一次明显拥堵出现前的 0-279（秒）；第一个拥堵段直到路障 B1 和 B2 放置的 446 秒；此后 1 车道上基本没车，2 车道上继续拥堵，直到路障撤除后的 799 秒，这是第二个拥堵段；最后 160 秒构成第三个拥堵段。表 2 给出了这四个阶段的交通流参数。从表 2 可以看出几点：首先，通畅阶段与拥堵阶段交通流特性存在显著差异，前者的平均速度和平均车头间距都要明显大于后者，反映到轨迹线上则是前者的轨迹线斜率也明显大于后者，如图 14 所示。其次，不同阶段的平均加速度也有显著差异：在开始的通畅阶段，上游密度不大，速度较快，车辆接近事故点时开始减速，所以平均加速度为负并且绝对值较大；放置第一个路障一段时间后，上游流量增大导致拥堵发生，整个路段速度大幅降低且前后差异变小，所以平均加速度仍为负但绝对值减小；放置第二组路障后，1 车道基本无车，2 车道上游之前已经开始拥堵，到下游出口则开始释放，所以平均加速度变正但绝对值很小；路障撤除后，路段处在恢复阶段，前方相对拥挤，所以平均加速度又为较小的负值。最后，在 3903 个速度数据中，有 956 个显示正在换道，占比达到 24.49%，远大于一般路段。从表 2 可以看到，第一个拥堵阶段每秒平均换道数据量超过其他几个阶段一倍以上，接近通畅阶段四倍，说明换道行为大量发生在路障 A 已放置，但路障 B1 和 B2 还没有放置的时间段，第二组路障有效缓解了这一情况。

表 2 分时间段实测的交通流参数

Table 2 Empirical traffic parameters at each stage

时间段 (s)	平均速度 (km/h)	平均车头间距 (m)	平均加速度 (m/s/s)	换道数据量	每秒平均 换道数据量
0-279	52.70	25.46	-0.41	155	0.554
280-446	21.02	13.54	-0.21	350	2.096
447-799	17.34	12.17	0.04	288	0.816
800-959	21.02	17.77	-0.19	163	1.019
合计	25.39	15.81	-0.14	956	0.996

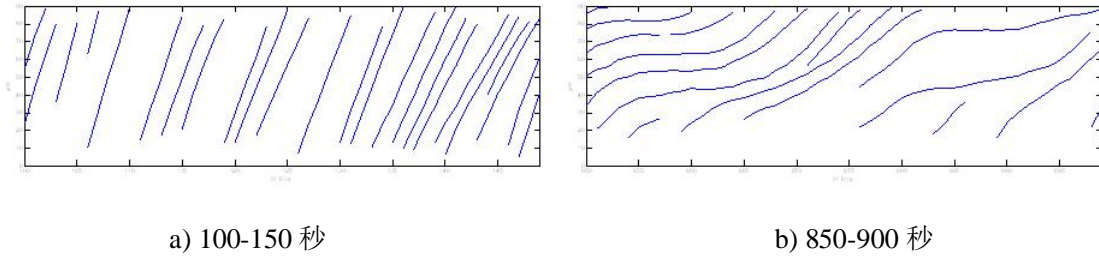


图 14 通畅阶段与拥堵阶段 2 车道轨迹线比较

Figure 14 Comparison of vehicle trajectories at free flow and at jamming stage 2

本节通过一个典型例子说明本文实测方法所得数据能够转换为车辆轨迹线，后者在交通流研究，特别是拥堵形成及释放阶段宏、微观模型研究中具有重要作用。本节结果显示，对于通畅状态下的道路，当下游某处发生局部交通事故而需要封闭部分车道时，为了保证事故路段的交通安全，路障应当设置在上游较远的位置。

## 6 结论与展望

一、本文采用改进的视频数据采集方法，通过对中国四条具有不同特征的城际高速公路实际交通过程进行长时间定点录像拍摄和数据提取，得到 10 万多组车辆即时位置、车速等数据，组成 9 个具有典型意义的城际高速公路交通流样本。

二、发现由于高比例货车的存在，城际高速公路交通流速度分布一般会呈现出显著不同于城市快速路的双峰特征。提出描述这种速度分布的组合双曲正割函数概率密度形式，其中参数具有明确物理意义，在实际数据拟合中得到成功应用。

三、通过实测数据得到车头时距的时间序列，它一般能服从对数正态分布假设。发现存在 5% 左右车头时距不超过 1 秒的高速跟驰数据，随着车道从快到慢，其比例逐步下降。高速跟驰可以分为主动高速跟驰和由于换道引起的被动高速跟驰两类。它使得各车道的平均密度和平均流量增大，慢车道的平均速度上升、而快车道的平均速度则基本不变或略有下降，同时还会诱发更多换道行为。

四、通过实测所得密度，乘以瞬时所有车辆速度的算术平均值，得到流量，构成“流量-密度”时间序列，再通过不同时间长度的平均画出不同的“流量-密度”基本图。城际高速公路基本图一般具有线性自由流特征，形态具有与时间无关性。由于高速跟驰现象，使得短间隔的基本图中密度和流量的最大值有所增大，和相对长间隔的 Kerner 的基本图定性一致，定量存在差异。

五、通过一个典型例子说明本文实测数据能够转换为车辆轨迹线，并在拥堵形成及释放研究中发挥作用。对于通畅状态下的道路，当下游某处发生事故而需要封闭部分车道时，为了保证事故路段的交通安全，路障应当设置在上游较远的位置。

本文研究中积累的上百小时实况交通录像和大量微观交通流数据已经得到妥善

保存,可以为以后国内外同行的相关研究提供基础。本文限于篇幅,尚未对车头间距、加速度、换道比例、密度时间序列等问题展开讨论,将有另文叙述。

## 参考文献:

- [1] Peeta S, Zhang P C, Zhou W M. Behavior-based analysis of freeway car-truck interactions and related mitigation strategies. *Transpn Res B* 2005, 39: 417-451.
- [2] Schonhof M, Helbing D. Criticism of three-phase traffic theory. *Transpn Res B* 2009, 43: 784-797.
- [3] Michalopoulos P G. Vehicle detection video through image processing: the autoscope system. *IEEE Trans on Vehicular Techology*, 1991, 40: 21-29.
- [4] Hoose N. IMPACTS: an image analysis tool for motorway surveillance. *Traffic Engineering and Control*, 1992, 33: 140-147.
- [5] Koller D, Daniilidis K, Thorhallson T, et al. Model-based object tracking in traffic scenes. *Proc of ECCV'94*, Springer-Verlag, NY, USA, 1994.
- [6] Coifman B, Beymer D, McLauchlan P, et al. A real-time computer vision system for vehicle tracking and traffic surveillance. *Transpn Res C* 1998, 6: 271-288.
- [7] Prati A, Micki I, Grana C, et al. Shadow detection algorithms for traffic flow analysis a comparative study. *IEEE Intelligent Transpn Sys Conf Proc*, Oakland, USA, 2001.
- [8] Cambridge Systematics, NGSIM BHL Data Analysis, Summary Report. Federal Highway Administration, 2004. <<http://ngsim.camsys.com/>>
- [9] Chen X Q, Li L, Zhang Y. A Markov model for headway/spacing distribution of road traffic. *IEEE Trans on Intell Transpn Sys*. 2010, 11(4): 773-785.
- [10] Koutsopoulos H N, Farah H. Latent class model for car following behavior. *Transpn Res B* 2012, 46: 563-578.
- [11] Aghabayk K, Sarvi M, Young W. Understanding the dynamics of heavy vehicle interactions in car-following. *J Transpn Eng*. 2012, 138(12): 1468-1475.
- [12] Moridpour S, Rose G, Sarvi M. Effect of surrounding traffic characteristics on lane changing behavior. *J Transpn Eng*. 2010, 136(11): 973-985.
- [13] Moridpour S, Rose G, Sarvi M, Mazloumi E. Influence of the surrounding traffic characteristics on lane changing decision of heavy vehicle drivers. *Road and Transport Res*. 2012, 21(3): 19-33.
- [14] Moridpour S, Sarvi M, Rose G. Lane changing models - a critical review. *Transpn Letter: Int J Transpn Res*. 2010, 2: 157-173.
- [15] Chiabaut N, Buisson C, Leclercq L. Fundamental diagram estimation through passing rate measurements in congestion. *IEEE Trans on Intell Transpn Sys*. 2009, 10(2): 355-359.
- [16] Chiabaut N, Leclercq L, Buisson C. From heterogeneous drivers to macroscopic patterns in congestion. *Transpn Res B*, 2010, 44: 299-308.
- [17] Ossen S, Hoogendoorn S P. Heterogeneity in car-following behavior: Theory and empirics. *Transpn Res C*, 2011, 19: 182-195.
- [18] 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.
- [19] Zheng X, Wu Z, Xu S X, et al. Video-based measurement and data analysis on traffic flow of urban expressway. *Acta Mech Sinica* 2011, 27(3): 346-353.
- [20] 林展熙, 吴正, 杨朝晖, 郑贤清. 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.
- [21] 吴胜春, 郑贤清, 郭明旻, 吴正. 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(6): 791-800.
- [22] 林展熙, 郭明旻, 郑贤清, 吴胜春, 吴正. 基于实测数据的交通流模型比较研究. *力学学报* 2010, 42(5): 848-855.



- [23] 吴正, 郭明旻, 郑贤清, 等, 大城市高架路实测数据分析与交通流模型研究. 力学学报 2010, 42(4): 789-797.
- [24] 吴正, 郭明旻, 许谦. 城市快速路交通流速密关系模型优化研究. 力学学报 2012, 44(4): 709-717.
- [25] 张英莹, 郭明旻, 吴正. 交通流实测数据的时间序列分析. 复旦学报(自然科学版) 2011, 50(6): 767-772.
- [26] 蒋仁言. 一种可有双峰形状的概率密度函数. 长沙交通学院学报 1997, 13(1): 1-8.
- [27] 关伟, 何蜀燕, 马继辉. 交通流现象与模型评述. 交通运输系统工程与信息 2012, 12(3): 90-97.
- [28] Neubert L, Santen L, Schadschneider A, Schreckenberg M. Single-vehicle data of highway traffic: A statistics analysis. *Phys Rev E*, 1999, 60(6): 6480-6490.
- [29] Wardrop J G. Some theoretical aspects of road traffic research. *Proc Instn Civ Engrs, Part II*, London, 1952.
- [30] Kerner B S, Rehborn H. Experimental properties of complexity in traffic flow. *Phys Rev E*, 1996, 53(5): 4275-4278.

## Survey report on traffic flow of several intercity highways in China

GUO MingMin<sup>1</sup>, YIN KaiHong<sup>1</sup>, WU Zheng<sup>1</sup> & XU Qian<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanics and Engineering Science, Fudan University, Shanghai 200433, China

<sup>2</sup> Jiaxing Radio and TV University, Jiaxing, Zhejiang, 314000, China

In this paper, more than 100 thousand pieces of vehicle location and velocity data are collected from traffic videos taken from four different intercity highways in China with improved acquisition method. It is discovered that due to the high proportion of trucks, the distribution of vehicle velocity has double peaks in general, which can be well fitted by a combined hyperbolic secant function put forward in this paper. Research shows that the time headway usually obey the log-normal distribution, about 5% of time headway is less than 1 second, which is defined as high-speed-car-following phenomenon (HSCF). HSCF, which can be classified into active type and passive type caused by lane-changing, can increase the average vehicle density and flow rate as well as induce more lane-changing actions. By time series of flow-density built according to empirical data and fundamental diagrams of flow-density drawn in accordance with different time scales, it is discovered that the fundamental diagram of intercity highway traffic is generally linear with respect to free flow and its shape is time-scale-independent. Meanwhile, HSCF will cause a rise in the maximum values of density and flow rate in fundamental diagram at short time interval, which is qualitatively consistent but quantitatively different with Kerner's fundamental diagram. If vehicles' trajectory converted from the empirical data is applied to the study of traffic jam formation and release, it can be concluded that the roadblocks should be placed upstream far from where an accident happens for the sake of safety.

**traffic engineering, traffic video, intercity highway**

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