

# 城市快速路瓶颈交通流失效生存分析

孙 剑, 张 娟

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 瓶颈处交通流失效(breakdown)是导致快速路拥堵的重要原因,其致因则是交通需求、驾驶行为及设施设计等多因素交互作用的结果. 针对快速路常发性瓶颈失效的随机特征,基于海量检测数据,提出了快速路瓶颈失效的生存分析模型. 该模型首先以速度、密度组合阈值法判断失效是否发生;然后统计失效发生时刻及发生前的交通流参数,利用生存函数描述失效发生概率与瓶颈通行能力的关系;进一步采用 Cox 回归模型分析瓶颈失效的影响因素. 上海市内环 3 个典型双车道常发性瓶颈点 277 个交通流失效事件分析表明,在 50% 的失效概率下,3 个瓶颈每车道通行能力分别为 1 341, 1 552, 1 662  $\text{veh} \cdot \text{h}^{-1}$ ;通过调控主线车速及驶入匝道流量可对瓶颈失效起到有效的保护作用. 利用该方法可精细化确定瓶颈点概率通行能力,并为快速路主动交通管理措施设计提供理论依据.

**关键词:** 快速路; 常发性瓶颈; 失效; 生存分析; 通行能力

**中图分类号:** U121

**文献标志码:** A

## Survival Analyses of Traffic Flow Breakdown at Urban Expressway Bottlenecks

SUN Jian, ZHANG Juan

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** A major cause for the urban expressway congestion is the traffic flow breakdown at bottlenecks due to the combined effects of traffic demand, driving behavior and design of traffic facilities. For the probabilistic nature of breakdown at urban expressway recurring bottlenecks, survival-analysis models of breakdown were proposed based on a large scale of detector data. First, breakdowns were identified according to speed and density thresholds, and then traffic parameters before or during breakdown interval were collected, and the relationship between the breakdown probability and the bottleneck capacity was described by survival function. Finally, factors of bottleneck breakdowns

were analyzed with Cox regression models. An analysis of 277 breakdown events at three typical two-lane recurring bottlenecks in the inner ring in Shanghai shows that the traffic capacities of a single lane at these bottlenecks are 1 341, 1 552 and 1 662  $\text{veh} \cdot \text{h}^{-1}$  respectively when the probability of breakdown is at 50%. To adjust or control both the speed on the main lane and the ramp capacity can effectively prevent bottlenecks from breakdown. The probability capacity of bottlenecks can be quantified more precisely with the proposed method, which provides a theory support for an active traffic management strategies and designs.

**Key words:** urban expressway; recurring bottlenecks; breakdown; survival analyses; capacity

快速路是大都市交通的命脉,瓶颈则是快速路运行畅通与否的关键. 瓶颈包括偶发性瓶颈(如交通事故、道路养护、车队慢车等)以及常发性瓶颈(车道减少、驶入匝道、交织区、坡道段等). 常发性瓶颈失效(breakdown)是交通需求、驾驶行为及设施设计等多因素交互作用的结果,大量实测数据表明,瓶颈失效不是通行能力的确定函数,具有随机特征<sup>[1-5]</sup>. 传统研究往往将通行能力定义为确定值,如 HCM2010<sup>[6]</sup>中将通行能力定义为在通常的道路和交通条件下,高速公路某一均匀路段所容许通过的持续 15 min 的最大流率. 而国际著名学者 Lorenz 和 Elefteriadou<sup>[1]</sup>以及其他学者<sup>[2, 7]</sup>均提出了随机通行能力的概念:在通常的道路和交通条件下,高速公路某一均匀路段,在期望的 breakdown 概率下,所容许通过的特定时间间隔的流率. 因此,构筑瓶颈失效概率与其通行能力的关系成为当前研究的热点问题.

目前,基于实测数据的概率型瓶颈失效模型主要有 3 类:简单间隔统计模型、Logistic 模型、负指数模型. 简单间隔统计模型以 Persaud<sup>[7]</sup>, Lorenz 和

收稿日期: 2012-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(51278362)

第一作者: 孙 剑(1979—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为交通仿真与实验,交通系统分析与优化.

E-mail: sunjian@126.com

Elefteriadou<sup>[1]</sup>为代表,通过识别不同情况下引发 breakdown 的时间间隔,估计在特定流量水平下的 breakdown 概率. Brilon<sup>[8]</sup>进一步将流量、密度划分成不同的水平,对每一交叉水平下 breakdown 概率进行统计. 上述研究均发现 breakdown 在一个较大范围流率水平下发生,并且随着流率的增加, breakdown 的概率也在增加. Logistic 模型以 Persaud<sup>[4]</sup>等人为代表,其规定发生 breakdown 的时间间隔概率  $p$  为 1,而没发生 breakdown 的概率为 0,以此构建 Logistic 模型,最终将瓶颈失效描述为交通量函数. 结果显示,瓶颈失效是交通量的增函数,并在某段交通量水平下,失效概率增长剧烈. 负指数模型以 Ramakrishnan 和 Banks<sup>[9]</sup>为代表,其将瓶颈失效的概率问题转换为瓶颈失效前稳定流持续时间的问题. 研究表明,稳定流量与持续时间存在极弱相关性, Banks<sup>[10]</sup>对美国高速公路瓶颈的分析结果进一步验证了此结论.

以上研究均以失效事件为样本,仅统计失效时刻的交通流量,将其作为失效前最大流量,即通行能力. 事实上,由于失效为随机事件,在失效前,仍存在一段时间稳定流流率大于通行能力但是未失效的场景,并且在相同主线流量水平下,瓶颈失效的发生与否在概率特征的指导下出现二值结果,以往研究在瓶颈失效建模时往往忽视此类数据的作用,如何合理有效利用样本数据是模型构筑的关键. 近年来应

用越来越广泛的生存分析,可以有效考虑信息相对缺失的非完全数据. 另外,现有研究大都关注流量与失效的关系,而未考虑流量、速度及占有率 3 个基本参数对失效的影响,而这些参数恰是新一代主动交通管理系统调控的指标. 鉴于此,本文引入生存分析模型,对快速路典型常发性瓶颈交通流失效概率进行研究,同时运用 Cox 比例风险模型解析交通流基本参数对失效的影响.

## 1 数据来源

本文数据来源于 2009 年 3 月 20 日—31 日、9 月 21 日—9 月 27 日共 19 d 的上海市快速路感应线圈检测数据,选择典型工作日和交通运行场景,经过数据质量校核,实际共利用 16 d 检测数据. 检测参数包括以车道为基础的流量、点速度、占有率,每 20 s 系统上传一次数据. 为对比分析起见,本文在内环快速路系统选择 3 个因驶入匝道导致的常发性瓶颈点,其道路线形均为平直路段,车道宽度和限速相同,下游均为单向双车道快速路,但其汇入方式稍有差别. 3 个瓶颈点分别为内环外线广中路驶入匝道、内环内线武宁路驶入匝道和内环外线武宁路驶入匝道,观测位置如图 1 中粗体断面线所示,为简便起见,以 NHWX56, NHNX40, NHWX38 来代表 3 个瓶颈点,其检测线圈布置和汇入方式如图 1 所示.

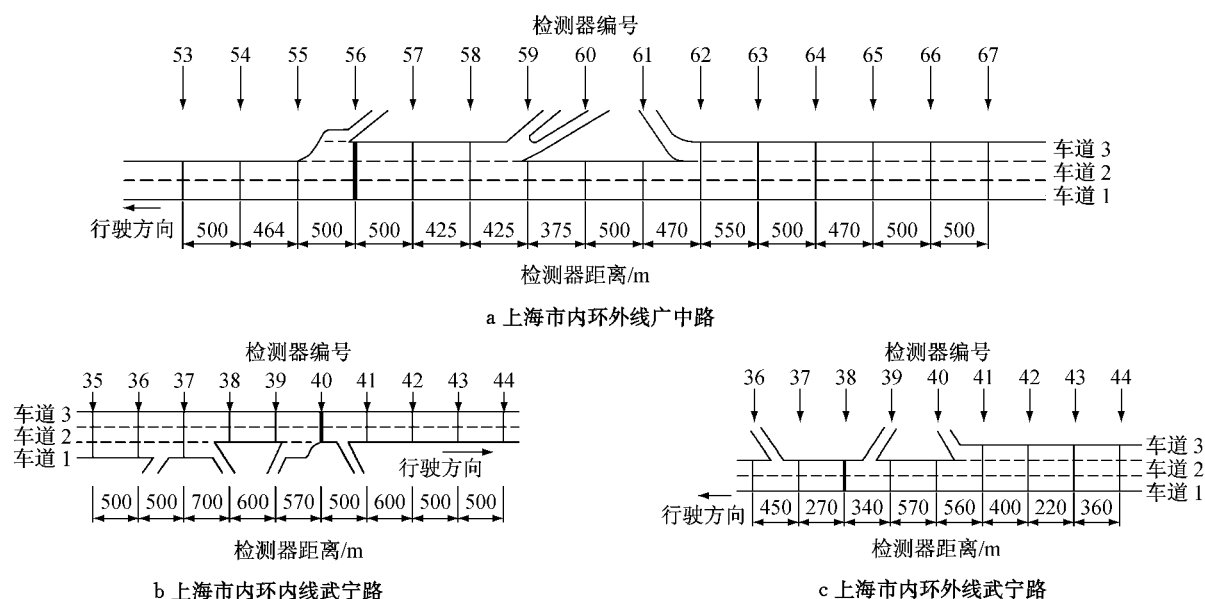


图1 快速路瓶颈点示意图

Fig.1 Schematic of the expressway bottlenecks

## 2 生存分析

### 2.1 瓶颈点失效识别

从交通流长期运行特征来看,瓶颈失效是概率事件;而对于给定交通场景、交通状态,交通参数与瓶颈失效之间存在确定的关系。目前,识别常发性瓶颈失效的方法主要有阈值法、变形累计曲线法、模糊集法。阈值法主要以单一交通参数、组合交通参数或其变形作为指标识别瓶颈失效,如 Daganzo<sup>[11]</sup>, Das 等<sup>[12]</sup>, Hall 等<sup>[13]</sup> 分别利用占有率、速度、双占有率、占有率与流量比率作为阈值识别瓶颈失效事件;变形累计曲线法由 Cassidy 等<sup>[14]</sup> 提出,通过平移得到相邻断面累积流量间横、纵向偏移,从而确定瓶颈的产生时刻和位置;模糊集法以 Kerner<sup>[15]</sup> 的三相交通流理论应用为代表,采用基于规则的模糊集理论识别交通流状态的转变。3种识别方法中,变形累计曲

线法不利于计算机操作,而模糊集法其规则的制定对数据依赖性很强,且不同瓶颈点其规则需要调整。阈值法操作简单,便于自动化处理,只要阈值组合选择得当,即可准确判定失效的发生<sup>[3, 7]</sup>。因此,本文根据上海市快速路监控中心交通状态预报阈值划分以及海量历史交通参数时间序列,参考 Das 和 Levinson 的双占有率阈值<sup>[3]</sup> 对瓶颈失效识别的研究,选定连续 5 min 空间平均速度低于  $55 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  并且密度高于  $26 \text{ veh} \cdot \text{km}^{-1}$  时则认为瓶颈交通流发生失效。图 2 为 NHNX40 瓶颈点 2009 年 3 月 26 日的速度、密度时序图,根据本文选择的速度、密度阈值识别到当天出现 3 次瓶颈失效事件,分别位于 9:45, 13:15, 20:50 集计间隔中,如图 2 中大号正方形标记所示。独立瓶颈失效开始至结束期间的样本数据对瓶颈失效概率的研究没有意义,不予以考虑。通过对 3 个瓶颈点 16 d 有效数据的分析,最终获得样本情况如表 1 所示。

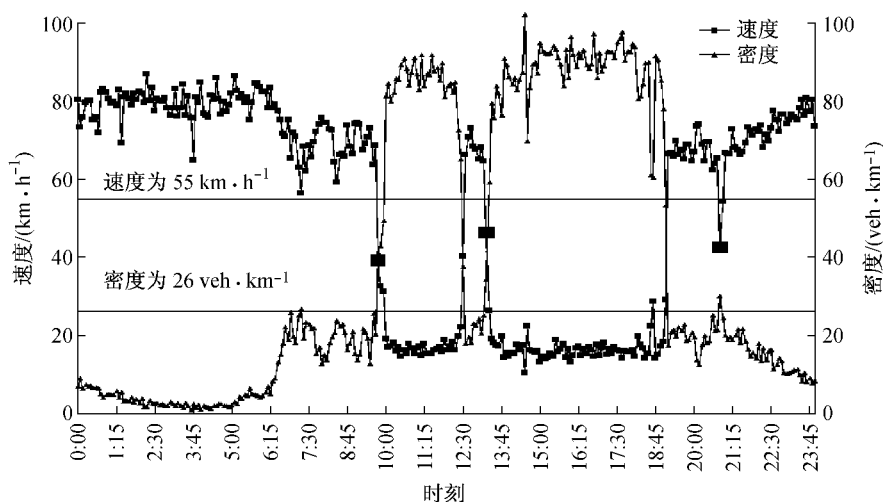


图2 内环内线武宁路瓶颈点常发性瓶颈识别图

Fig.2 Identification of breakdown at Wuning bottleneck

表1 样本量  
Tab.1 Sample data

瓶颈代码	瓶颈位置	样本总量	有效样本量	失效事件数
NHWX56	内环外线广中路瓶颈点	4 599	2 355	47
NHINX40	内环内线武宁路瓶颈点	4 601	1 604	74
NHWX38	内环外线武宁路瓶颈点	4 603	2 138	156
合计		13 803	6 097	277

### 2.2 瓶颈失效生存分析

在许多学科领域,都存在对某给定事件发生的时间进行估计和预测的问题。研究事件发生时间的规律问题就是生存分析问题<sup>[16]</sup>。目前,已有学者<sup>[17-18]</sup> 引进生存分析于交通工程中的行人过街最大等待时间分析、通勤者出行行为特征分析。本文所研

究的瓶颈交通流失效问题可以类比成生存分析问题,即快速路主线流量的增长和主线交通保持畅通为“生存时间”,主线交通流发生瓶颈失效现象为“死亡事件”;生命时间变量为瓶颈通行能力(无特殊说明,本文中通行能力均为单车道通行能力)。

#### 2.2.1 瓶颈失效生存模型构建

根据观测对象进入或退出观察的时间差别,生存分析<sup>[16]</sup> 经常遇到的数据有完全数据(completed data)和删失数据(censored data)。本文中完全数据是指在观测的流量下失效发生,这时记录到的“时间”信息是完整的,文中以失效前稳定流率作为瓶颈的通行能力,因此在模型数据输入时将失效前的稳

定流率对应时间间隔的参数作为有效完全数据;删失数据是指在观测的流量下没有发生失效现象,这时记录到的“时间”信息是不完整的,这种生存时间数据称为删失数据。由于相同水平的主线流率引发瓶颈失效的结果不同,因此,本文分析数据除包括发生瓶颈失效现象对应的5 min 集计间隔的完全数据外,还包含在失效发生前或者恢复后并没有引发失效的任何5 min 集计间隔的删失数据,即表1中有效样本量与失效事件数的差值。删失数据包含了瓶颈失效的概率性信息,因此,在生存模型中不可忽视删失数据的影响。

考虑删失数据和非删失数据对瓶颈失效建立生存模型,其核心是生存函数的估计。生存函数反映了个体生存至时刻  $x$  的概率,瓶颈失效的生存函数即为在快速路主线流量增加至  $q_i$  后瓶颈交通流仍为畅通的比例。生存函数是概率密度函数  $f(q)$  的积分,即

$$S(q_i) = P(Q > q_i) = \int_{q_i}^{\infty} f(q) dq \quad (1)$$

式中:  $P(Q > q_i)$  表示事件  $\{Q > q_i\}$  发生的概率。由于  $f(q)$  函数曲线与坐标轴横轴之间的面积为1。因此

$$f(q) = -\frac{dS(q)}{dq} \quad (2)$$

$S(q_i)$  的图形也即生存曲线,陡峭的生存曲线表示较低的生存率或较短的生存时间,平缓的生存曲线表示较高的生存率或较长的生存时间。生存函数参数估计中常用的分布模型有指数分布、威布尔分布、对数正态分布等,非参数估计中常用寿命表方法和 Kaplan-Meier(K-M) 估计法等,由于本研究所采用的瓶颈失效样本分布未知,且含有删失数据,因此采用适用于非参数估计的 K-M 法,又称乘积限(product-limit)估计法,或有限乘积估计法。

K-M 估计式通过缩减抽样方法构造。本文中,由于失效事件发生在主线流量  $q$  处,所以  $S(q)$  只会在这些流量处发生跳跃,其他流量处没有任何事件发生的信息。用一个离散值,即只在流量点  $q_1, q_2, \dots, q_D$  处具有数值的分布来估计  $S(q)$ 。K-M 估计式定义如下:

$$\hat{S}(q) = \begin{cases} 1, & q < q_1 \\ \prod_{q_1 \leq q} [1 - \frac{d_i}{Y_i}], & q \geq q_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $d_i$  为在主线流量  $q_i$  死亡(breakdown)的个体数;  $Y_i$  为在主线流量  $q_i$  面临危险的个体数。

对于包含删失数据的瓶颈失效生存函数估计,其步骤如下:

Step 1 将总量为  $Y$  的样本观察值(主线流量为  $q$ )由小到大依次排列,秩次  $i=1, 2, \dots, n$ 。如遇非删失值与删失值相同时,将删失值排在前面。

Step 2 列出每阶段(本例中以  $15 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$  为单位)的样本总数  $Y_i$ , 删失总数  $c_i$ 。

Step 3 计算每个流量水平下死亡概率  $q_c$  及生存概率  $p_c$ ,  $q_{ci} = d_i/Y_i$ ,  $p_{ci} = 1 - q_{ci}$ 。

Step 4 求瓶颈通行能力超过各流量水平的生存率  $S(q_i) = \prod_{j=1}^i p_{cj}$ 。

Step 5 计算生存率的标准误差

$$SE[S(q_i)] = S(q_i) \sqrt{\sum_{j=1}^i \frac{d_j}{Y_j(Y_j - d_j)}} \quad (4)$$

Step 6 绘制生存率曲线。将各非删失值及其对应的生存率标在直角坐标纸上,然后将各点垂直向下再水平向右连成阶梯形。

本文对所有瓶颈失效数据分别建立不考虑删失数据和考虑删失数据的生存分析模型,得到如图3所示的累积生存曲线。可以看到,在50%的瓶颈失效概率下,不考虑删失数据和考虑删失数据的生存曲线对应的瓶颈通行能力分别为1 523, 1 606  $\text{veh} \cdot \text{h}^{-1}$ , 显然,两个曲线有明显差异。因此,在本文的生存分析模型中均考虑删失数据。

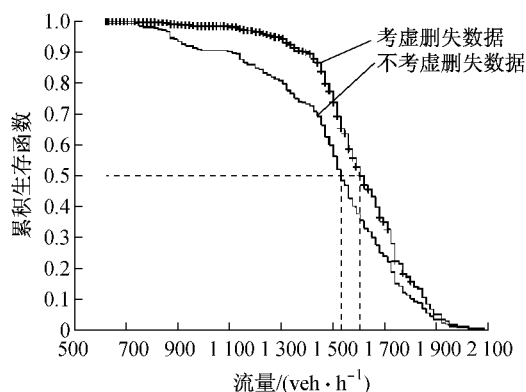


图3 考虑删失数据和不考虑删失数据生存曲线对比图

Fig.3 Survival curves with censored data or without censored data

另需指明的是,乘积限估计法不需要指定分布类型,但可能存在尾部估计缺失的弊端。为了克服乘积限尾部估计的弊端,本文进一步采用常见分布函数对 breakdown 样本数据(3个瓶颈数据整体)进行拟合,发现威布尔分布拟合最精确。采用最小二乘法估计分布的形状参数和尺度参数,分别为5.171 6, 1 487.8,进而得到分布函数为

$$F(q) = \begin{cases} 0, & q < 0 \\ 1 - \exp\left(-\left(\frac{q}{1487.8}\right)^{5.1716}\right), & q \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

当瓶颈点最大观测流量为删失数据时,建议应用威布尔分布来估计该瓶颈点的生存函数。

考虑删失数据,对3个典型路段瓶颈失效进行生存分析,结果如图4所示。可以看出,在50%的瓶颈失效概率下,NH WX56, NH NX40, NH WX38 瓶颈点的通行能力分别为1341, 1552, 1662 veh · h<sup>-1</sup>。3个典型路段均由于驶入匝道车辆的汇入导致瓶颈失效,但是瓶颈点道路设施设计以及由此产生的驾驶行为差异,影响失效发生的概率。内环外线广中路瓶颈点由于道路线形设计缺陷,存在驶入匝道的加速车道和主线车道减少的双重作用,上游由4车道突变为2车道,交通流过于集中,导致瓶颈过早失效;内环内线武宁路瓶颈点存在约870 m的交织区,由于驶入匝道的加速车道与主线间设置的长距离隔离墩使经匝道驶入车辆与主线的汇入点延后,从而导致该路段的实际交织范围缩短至约530 m;而内环外线武宁路瓶颈点交织范围为600 m左右。交织程度越高,通行能力的削弱越大。本节3个瓶颈通行能力的差异印证了 Brilon 教授的观点:驾驶行为的差异会引起极大的道路通行能力波动。

根据文献[1],如果选择一个 breakdown 概率阈值,那么对应于此概率的流量即为通行能力。本文通过3个典型路段瓶颈失效的生存分析,可以比较全面地得到不同主线流量下对应的失效概率,对交通管理部门为已有快速路通行能力的改善或者新建快速路通行能力的制定有一定的辅助作用,例如,对内环内线武宁路瓶颈位置进行通行能力的改善,允许存在50%的 breakdown 概率,那么,通行能力可以设为1552 veh · h<sup>-1</sup>。

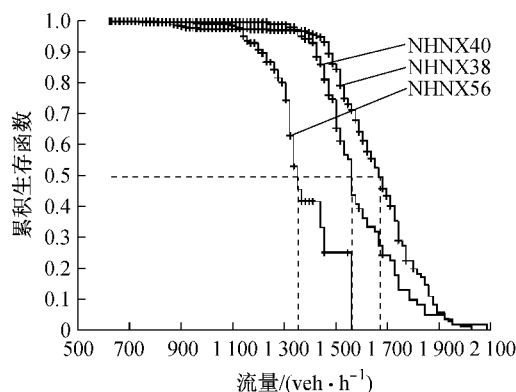


图4 各瓶颈失效生存曲线图

Fig.4 Survival curves during the breakdown of three bottlenecks

## 2.2.2 Cox 比例风险回归建模

Cox 回归模型<sup>[16]</sup>与一般的回归分析不同,它不是直接用生存时间作为回归方程的因变量,协变量对生存时间的影响是通过风险函数和基础风险函数的比值反映的,其中风险函数和基础风险函数未知,另外偏回归系数的估计需要借助于偏似然函数的方法。在完成参数估计的情况下,可对基础风险函数和风险函数做出估计,并计算每一个时刻的生存率。

本研究中,通过 Cox 时间独立协变量模型研究宏观交通参数对瓶颈通行能力产生的影响。引入协变量  $X$  于风险函数内,模型表达为

$$h(q|x) = h_0(q) \exp\left(\sum_{j=1}^p a_j x_j\right) \quad (6)$$

式中: $h(q|x)$ 表示具有协变量  $X$  的个体在流量为  $q$  时的危险率; $h_0(q)$ 为所有危险因素为零时的基础风险率,它是未知的,但假定它与  $h(q|x)$  是成比例的。

$\alpha = (a_1, a_2, \dots, a_p)^T$  为偏回归系数向量。

若  $\alpha_i > 0$ , 则  $h(q/x)/h_0 > 1$ , 该因素为危险因素;若  $\alpha_i < 0$ , 则  $h(q/x)/h_0 < 1$ , 该因素为保护因素;若  $\alpha_i = 0$ , 则  $h(q/x)/h_0 = 1$ , 该因素为无关因素。

因此只需研究  $\exp(\sum_{j=1}^p a_j x_j)$  部分即可掌握不同因素对瓶颈失效的影响情况,其参数可通过样本的实际观察值来判断。

众多学者仅将瓶颈流量看做瓶颈失效的唯一致因, Banks 等<sup>[19]</sup>则认为瓶颈上游主线流量和匝道流量对瓶颈失效影响很大,进而考察控制匝道流量对瓶颈的抑制作用。随着快速路主动交通管理理论的提出,速度控制被认为是改善交通流运行的主要举措。本研究考虑的协变量包括瓶颈上游主线流量  $m$ 、主线车速  $v$ 、瓶颈上游驶入匝道流量  $r$ , 探求通过协同调控匝道流量和主线速度改善瓶颈交通流运行的可能性。3个瓶颈点的 Cox 比例风险回归模型结果为

$$h_1(q) = h_0(q) \exp(-0.082v - 0.300m - 0.000r) \quad (7)$$

$$h_2(q) = h_0(q) \exp(-0.090v - 0.004m - 0.005r) \quad (8)$$

$$h_3(q) = h_0(q) \exp(-0.160v - 0.007m - 0.005r) \quad (9)$$

Cox 模型结果显示,瓶颈通行能力与主线车流量、车速、匝道车流量相关。除去式(7)中匝道车流量回归系数的特别之处,3个协变量的回归系数均为负,说明给定瓶颈最大流率,降低任一个协变量的值均可以降低死亡的风险,即失效概率。而式(7)为内

环外线广中路瓶颈点的Cox回归方程,其中匝道车流量的回归系数为零,主要由于该瓶颈点7:00以后广中路驶入匝道关闭,仅有极少的车辆汇入主线。另外两个Cox回归方程中匝道车流量回归系数为负,说明降低匝道流量可以降低瓶颈失效概率。该结果为匝道信号控制等交通管理措施提供了强有力的数据支撑。因此,Cox回归结果对于快速路主动交通管理的实施具有重要指导意义。

### 3 结论

本文针对快速路瓶颈失效的随机特征,利用大量的实测数据,在多个瓶颈失效样本识别的基础上,构筑了失效的生存分析模型,并利用Cox模型对重要影响因素进行了回归分析,主要结论如下:

(1) 与传统的统计模型相比,生存分析模型既可考虑失效样本参数,又可将删失数据(未失效样本参数)引入建模过程,因而可更精确地对瓶颈失效特征进行分析。

(2) 上海市内环3个双车道典型瓶颈点(外线广中路入匝道、内线武宁路入匝道、外线武宁路入匝道)277个交通流失效事件分析表明,在50%的失效概率下,3个瓶颈每车道通行能力分别为1 341, 1 552, 1 662 veh·h<sup>-1</sup>。

(3) 道路设施布局和驾驶行为的差异导致3个瓶颈通行能力的差异。初步分析,由于车道数减少导致的瓶颈通行能力的降幅大于单纯交织段导致的通行能力的降幅。

(4) 通过Cox回归模型分析瓶颈通行能力的影响因素,结果显示,瓶颈上游主线车流量、瓶颈车速、瓶颈上游驶入匝道车流量对于降低瓶颈失效概率起到保护作用,因而快速路匝道控制及主线可变速度引导措施将延缓或降低瓶颈失效概率。

### 参考文献:

- [1] Lorenz M R, Elefteriadou L. Defining freeway capacity as function of breakdown probability [J]. *Transportation Research Record*, 2001(1776): 43.
- [2] Elefteriadou L, Roess R P, Mcshane W R. Probabilistic nature of breakdown at freeway merge junctions[J]. *Transportation Research Record*, 1995(1484): 80.
- [3] Zhang L, Levinson D. Some properties of flows at freeway bottlenecks [J]. *Transportation Research Record*, 2004(1883): 122.
- [4] Persaud B, Yagar S, Tsui D, et al. Breakdown-related capacity for freeway with ramp metering[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2001(1748): 110.
- [5] Zhang L, Levinson D. Ramp metering and freeway bottleneck capacity[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2010, 44(4): 218.
- [6] HCM. Highway capacity manual [M]. Washington D C: Transportation Research Board of the National Academies, 2010.
- [7] Persaud B, Yagar S, Brownlee R. Exploration of the breakdown phenomenon in freeway traffic[J]. *Transportation Research Record*, 1998(1634): 64.
- [8] Brilon W, Geistefeldt J, Regler M. Reliability of freeway traffic flow: a stochastic concept of capacity[C]//*Proceedings of the 16th International Symposium of Transportation and Traffic Theory*. Amsterdam: Elsevier, 2005:125-144.
- [9] Ramakrishnan V, Banks J H. Relationship between mean flow rate and probability of breakdown at freeway bottlenecks [C/CD]// *Transportation Research Board 85th Annual Meeting*. Washington D C: Transportation Research Board, 2006.
- [10] Banks J H. Flow breakdown at freeway bottlenecks: evidence from automated flow analysis [J]. *Transportation Research Record*, 2009(2099): 14.
- [11] Daganzo C F, Cassidy M J, Bertini R L. Possible explanations of phase transitions in highway traffic [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 1999, 33(5): 365.
- [12] Das S, Levinson D. Queuing and statistical analysis of freeway bottleneck formation [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2004, 130(6): 787.
- [13] Hall F L, Allen B L, Gunter M A. Empirical analysis of freeway flow-density relationships [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 1986, 20(3): 197.
- [14] Cassidy M J, Windover J R. Methodology for assessing dynamics of freeway traffic flow[J]. *Transportation Research Record*, 1995(1484): 73.
- [15] Kerner B S. Theory of breakdown phenomenon at highway bottlenecks [J]. *Transportation Research Record*, 2007(1710): 136.
- [16] 彭非,王伟. 生存分析[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2004.  
PENG Fei, WANG Wei. *Survival analysis*[M]. Beijing: China Renmin University Press. 2004.
- [17] Sun J, Liu G X, Li K P, et al. Survival analysis on pedestrian's maximum waiting time at signalized intersections [C/CD]// *Transportation Research Board 89th Annual Meeting*. Washington D C: Transportation Research Board, 2010.
- [18] 陈团生. 通勤者出行行为特征与分析方法研究[D]. 北京: 北京交通大学交通运输学院, 2007.  
CHEN Tuansheng. *Travel behavior characteristics analysis for commuter*[D]. Beijing: College of Transportation of Beijing Jiaotong University, 2007.
- [19] Banks J H. Two-capacity phenomenon at freeway bottleneck: a basis for ramp metering? [J]. *Transportation Research Record*, 1991(1320): 83.