

# 基于拥堵概率的城市快速路入口匝道控制策略<sup>\*</sup>

李嘉<sup>1†</sup>, 许恺钧<sup>1,2</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 深圳市市政设计研究院有限公司, 广东 深圳 518029)

**摘要:**为解决城市快速路交通拥挤问题,开展快速路入口匝道控制策略研究.采用现行规范与现场数据建立VISSIM微观仿真模型,基于交通仿真分析,建立快速路入口合流区的拥堵概率模型,提出基于拥堵概率的入口匝道控制策略.通过收集主线上游流量以及入口匝道流量,预测拥堵概率;若拥堵概率超过其临界值,则启用入口匝道控制系统,确定匝道入口调节率和信号周期.研究表明,相比无信号控制,基于拥堵概率的快速路入口匝道控制策略能够使拥堵概率降至0.1左右,主线车速提高约20%.

**关键词:**快速路;交通拥堵;预测模型;入口匝道;拥堵概率

**中图分类号:**U491.4

**文献标志码:**A

## Ramp Metering Strategy for Urban Expressway Based on Breakdown Probability

LI Jia<sup>1†</sup>, XU Kaijun<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Shenzhen Municipal Design & Research Institute Co, Ltd, Shenzhen 518029, China)

**Abstract:** To release and solve traffic jam on expressway, it is necessary to investigate the ramp metering strategy of expressway. Current specification and field data were used to build the VISSIM simulation model. The breakdown probability models of expressway ramp were established by microscopic traffic simulation, and a ramp metering strategy based on breakdown probability model was put forward. According to the mainstream and ramp volume, the breakdown probability was predicted. If the probability is higher than the threshold, the metering system turns on, and the on-ramp metering rate and cycle time are calculated. Compared with a ramp without metering strategy, the breakdown probability reduced to about 0.1, while the speed of mainstream increased by about 20%.

**Key words:** expressway; traffic congestion; predict model; on-ramp; breakdown probability

近十年来,我国的小汽车保有量以平均每年18.6%的速度增长.为保证交通顺畅,我国各大城市先后建成了各式快速路系统.但是,大量的车流涌向快速路,导致快速路经常发生拥堵<sup>[1-2]</sup>.针对快速

路的交通现状,需制订相应的交通管理策略以改善快速路的交通环境.在现有的快速路交通管理策略中,入口匝道信号控制被认为是最直接有效的快速路交通控制方式<sup>[3]</sup>.

\* 收稿日期:2016-03-17

基金项目:国家科技支撑计划项目(2015BAJ03B01), National Science and Technology Support Program(2015BAJ03B01)

作者简介:李嘉(1962-),女,湖南长沙人,湖南大学教授

† 通讯联系人, E-mail: lijia@hnu.edu.cn

目前常用的入口匝道信号控制策略包括定时控制<sup>[4]</sup>、需求-容量控制(DC控制)<sup>[5]</sup>和ALINEA控制<sup>[6]</sup>,通过在入口匝道上设置信号灯控制匝道车辆进入主线的频率.然而,以上3种控制策略均存在一定的局限性.定时控制策略无法适应多变的交通状况.需求-容量控制策略没有反馈机制,容易导致控制周期振荡.ALINEA策略重点关注主线上车流的情况,容易引发匝道车辆排长队现象.以上3种控制策略缺乏明确的启动与关闭控制阈值,只能解决常发性拥堵问题.郝媛等人<sup>[7]</sup>通过数据采集与分析,确定拥堵发生,提出速度阈值与流率阈值.高万宝等<sup>[8]</sup>通过将主线流量密度保持在期望密度附近,以达到主线保持高流量运行的目的.Brilon等<sup>[9]</sup>提出采用PLM法计算州际公路在不同流量下的拥堵概率.Kondyli等<sup>[10]</sup>将拥堵概率的概念应用到州际公路的匝道控制上,根据拥堵概率设置了不同主线流量的最大入口调节率.

本文拟通过拥堵概率预测,确定入口匝道控制策略的启动阈值,并提出一种基于拥堵概率的入口匝道控制策略.该策略通过收集主线与匝道的实时交通流量预测合流区的拥堵概率,当拥堵概率超过临界拥堵概率时,启动匝道控制系统,根据主线流量改变信号周期,调整匝道车流进入主线的频率,从而达到降低合流区拥堵,提高主线运行速度的目的.

## 1 城市快速路拥堵概率预测

### 1.1 交通调查与数据分析

为建立动态交通流模型,需要现场采集车辆的自由流速度.调查地点选取流量较小,车辆间影响小的路段,将录像设备架设于某城市快速路旁高层楼顶.选择在周三下午进行视频录制.在视频区域内选取一段距离已知的路段,设置截屏时差0.2s,通过视频截图获得道路上车辆通过该路段的时间间隔,从而计算出车辆的速度.现场如图1所示.

对小车和大车分别进行统计,其中大车是指大客车、大货车等大型车辆,其余车辆为小车.视频共获取小车数据849组,大车数据140组,大车率为14.2%.数据统计结果如图2所示.

图2显示,小车速度分布于40~120 km/h之间,大车速度分布于30~90 km/h之间.对收集的数据采用莱以特准则和非参数检验方法检验个体与总体有效性.其中,小车的数量超过500个,莱以特准则取 $\pm 3\sigma$ 为合理区间,大车数据由于不足500

个,莱以特准则取 $\pm 3\sigma$ 为合理区间;非参数检验方法以 $\alpha=0.05$ 为检验标准.检验结果见表1与表2.

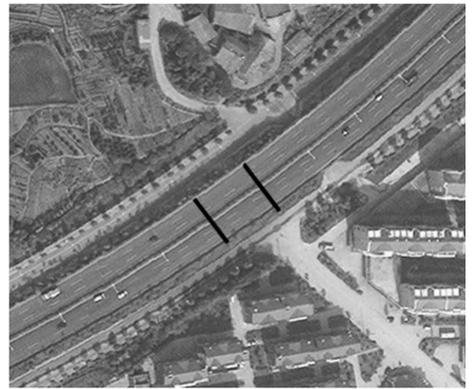


图1 车辆计时起止线示意图

Fig. 1 Diagram of vehicle timing line

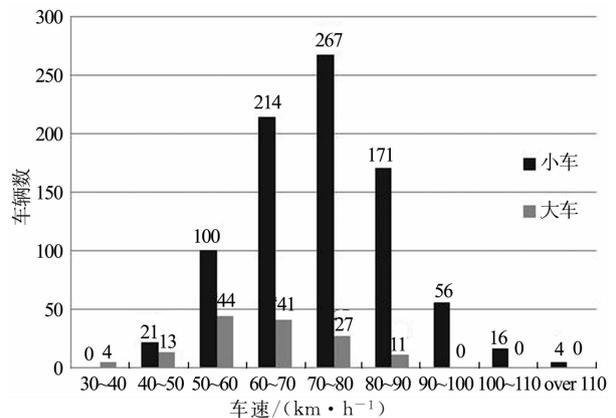


图2 车速计数分布

Fig. 2 Distribution of vehicle speed

表1 莱以特检验结果

Tab. 1 Pauta criterion result

车型	数据量	平均值/(km·h <sup>-1</sup> )	标准差	合理区间/(km·h <sup>-1</sup> )	有效数据量
小车	849	73.75	12.192	(24.985, 122.519)	847
大车	140	64.14	12.062	(27.954, 100.326)	140

表2 非参数检验结果

Tab. 2 Nonparametric tests result

车型	数据量	检验结果	检验标准( $\alpha=0.05$ )	检验结果
小车	497	5.257	9.488	有效
大车	140	3.914	5.991	有效

检验结果表明,小车调查数据中有2个数据超过莱以特检验的上限值,作为异常数据剔除,其余数据均有效,且通过总体有效性检验.

### 1.2 入口匝道仿真

某城市快速路主线设计速度为 80 km/h,加速车道长度为 160 m,渐变段长度为 50 m,采用 Vis-sim 建立城市快速路合流区拓扑结构模型,如图 3 所示。

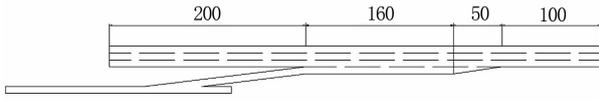


图 3 入口匝道汇合段拓扑模型  
Fig. 3 Topology model of merge area

将现场调查(图 1 中)的车速分布导入 Vissim 的车速累计概率数据库中。根据 Vissim 说明书对跟车模型的介绍,采用 Wiedemann74 跟车模型模拟跟车时驾驶员的反应,跟车模型与换道模型采用默认参数。

### 1.3 拥堵概率预测

根据《城市快速路设计规程》<sup>[11]</sup>,设计速度为 80 km/h 时,若主线平均速度低于 40 km/h,则认为发生拥堵。本文将拥堵时长与总观察时长的比值定义为拥堵概率,即:

$$P_b = \frac{T_b}{T_t} \quad (1)$$

式中:  $P_b$  为拥堵概率;  $T_b$  为发生拥堵的时长, min;  $T_t$  为总仿真时长, min。

在同一流量组合下,为获得较多的数据,宜采用不同的随机种子进行仿真,且采用较长的仿真时间。仿真开始,需要一定的时间使车流在各路段中达到稳定状态,因此应保证足够的预热时间,数据采集应在预热时间之后进行。根据上述原则,对主线流量与匝道流量分别取值,构成流量组合:主线流量取 3 000~5 500 辆/h,匝道流量取 100~1 900 辆/h;每一增量为 100 辆/h。对于每一组流量组合,取 100 个随机种子,每次仿真时长为 3 600 s,预热时间 600 s。车速数据采集点在主线渐变段结束处。若在一个仿真分钟内,所采集的平均速度低于 40 km/h,则认为该仿真分钟的状态为拥堵,否则判断为非拥堵。仿真试验过程如图 4 所示。

输出每组流量组合的拥堵概率,即可获得主线流量-匝道流量-拥堵概率分布。图 5 为典型的主线流量-匝道流量-拥堵概率关系曲线。

由图 5 可以看出,曲线可以分为 3 个阶段,第一阶段为缓增阶段,这一阶段的拥堵概率呈现为缓慢的直线增长趋势,意味着此时的匝道流量较小,匝道流量的增加对主线车流的影响有限,几乎不会引发主线拥堵。第二阶段为加速阶段,这一阶段为凹曲线,此时匝道流量已经开始对主线车流造成影响,且

拥堵概率的增长值不断上升。第三阶段为速增阶段,与第一阶段不同的是,此时的拥堵概率快速增长,直线的斜率很陡,意味着此时匝道流量的增长对主线流量的影响非常显著,增加匝道流量将极大地引发主线的拥堵。

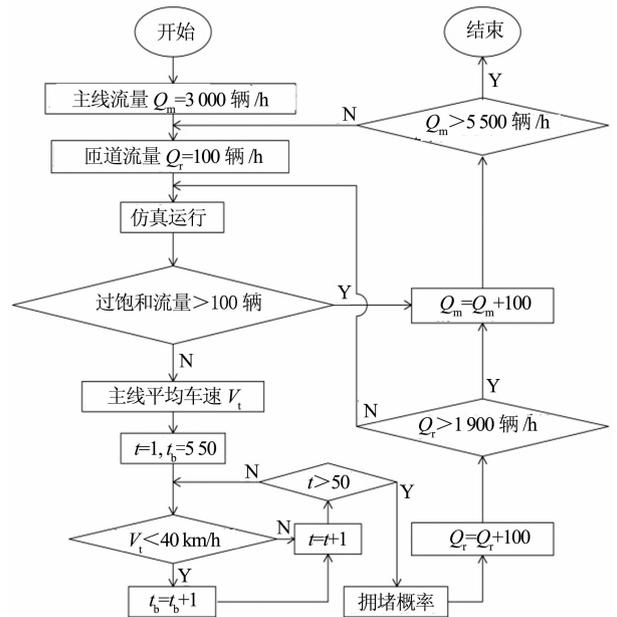


图 4 交通仿真流程图  
Fig. 4 Traffic simulation flow chart

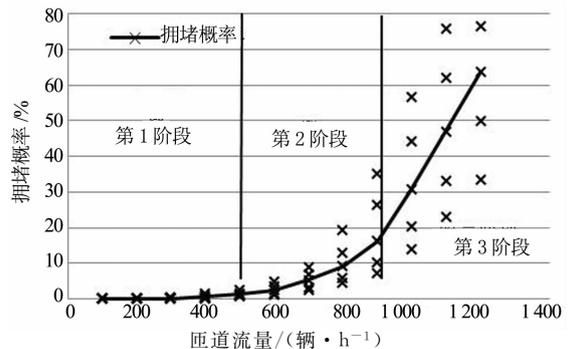


图 5 典型拥堵概率曲线  
Fig. 5 Typical breakdown possibility curve

主线流量-匝道流量-拥堵概率三维图像见图 6。

观察图 6 可以发现,匝道流量一定时,拥堵概率随主线流量的增长而增长;主线流量一定时,拥堵概率随匝道流量的增加而增长。本文采用二元四次多项式函数拟合拥堵概率曲面  $p(Q_m, Q_r)$ , 如式(2):

$$p(Q_m, Q_r) = a_{00} + a_{10} Q_m + a_{01} Q_r + a_{20} Q_m^2 + a_{11} Q_m Q_r + a_{02} Q_r^2 + a_{30} Q_m^3 + a_{21} Q_m^2 Q_r + a_{12} Q_m Q_r^2 + a_{03} Q_r^3 + a_{31} Q_m^3 Q_r + a_{22} Q_m^2 Q_r^2 + a_{13} Q_m Q_r^3 + a_{04} Q_r^4 \quad (2)$$

式中:  $p(Q_m, Q_r)$  为拥堵概率曲面函数,  $Q_m$  为归一化的主线流量,  $[0, 10]$ ;  $Q_r$  为归一化的匝道流量,

$[0, 10]$ ;  $a_{ij}$  为多项式系数,  $i, j$  为系数对应未知量的次数。

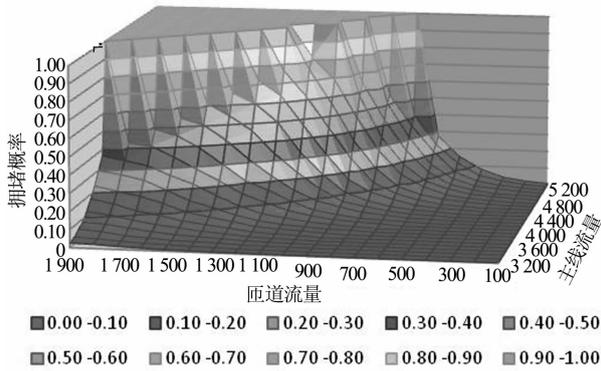


图6 主线流量-匝道流量-拥堵概率三维图  
Fig. 6 Graph of main stream volume, ramp volume and breakdown possibility

先将主线流量、匝道流量与拥堵概率进行归一化处理,再进行回归拟合,得到式(2)中各系数取值,见表3。

表3 回归方程系数表  
Tab. 3 List of coefficient of regression

系数	拟合值	系数	拟合值	系数	拟合值
$a_{00}$	-17.14	$a_{02}$	-22.21	$a_{31}$	0.098 8
$a_{10}$	7.734	$a_{30}$	0.003 9	$a_{22}$	-0.150 9
$a_{01}$	28.27	$a_{21}$	-0.129 1	$a_{13}$	-1.058 0
$a_{20}$	-1.053	$a_{12}$	5.222	$a_{04}$	-0.587 8
$a_{11}$	-7.66	$a_{03}$	6.792	—	—

参考文献[12],主线与匝道流量的取值范围为  $Q_m \in [0, 5.7], Q_r \in [0, 1.9]$ ,可得拥堵概率的预测模型:

$$p(Q_m, Q_r) = \begin{cases} 0, & p(x, y) \leq 0; \\ -17.14 + 7.734Q_m + 28.27Q_r - 1.053Q_m^2 - 7.66Q_mQ_r - 22.21Q_r^2 + 0.0039Q_m^3 - 0.1291Q_m^2Q_r + 5.222Q_mQ_r^2 + 6.792Q_r^3 + 0.0988Q_m^3Q_r - 0.1509Q_m^2Q_r^2 - 1.058Q_mQ_r^3 - 0.5878Q_r^4, & 0 < p(x, y) < 1; \\ 1, & p(x, y) \geq 1. \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $p(x, y)$  为预测拥堵概率,其他符号同前。  
对回归方程进行拟合优度检验,  $R^2 = 0.9737$ ,  $SSE = 0.2839$ ;函数通过置信度 95% 的 F 检验,回

归方程的拟合度较佳。

### 1.4 临界拥堵概率

临界拥堵概率是指可以容忍的最大拥堵概率。当拥堵概率超过临界拥堵概率后,拥堵发生的可能性将急剧增长,车流将处于不稳定状态。观察图5典型拥堵概率曲线,发现当进入第三阶段后,拥堵概率的增长率达到最大,拥堵概率0.2附近为其临界点。因此可以认为,0.2为临界拥堵概率,超过0.2后,应采取控制措施,避免拥堵概率继续增长。

## 2 基于拥堵概率的入口匝道控制策略

基于拥堵概率的入口匝道信号控制策略(Breakdown Probability Based Ramp Metering Strategy,简称BPB匝道控制策略)是通过收集主线上游流量以及入口匝道流量,计算拥堵概率,从而确定是否需要启用入口匝道控制系统。

### 2.1 BPB匝道控制原理

根据通行能力的随机性理论,BPB匝道控制方法认为通行能力不但与道路的几何形状、天气条件等有关,还与车辆之间的相互反应有关。快速路的入口匝道合流区存在大量相互交织的车辆,交通流情况比较复杂,采用入口匝道控制后,信号灯在时间上将交织车辆更均匀地分布在时间序列上,降低交织车辆间的影响程度,从而降低拥堵发生的概率。BPB匝道控制方法通过检测交通流量,预测拥堵概率,设计入口匝道控制策略,从而提高主线的通行能力及服务水平。

### 2.2 BPB匝道控制设计方法

在BPB匝道控制策略控制下,根据文献[4]对放行方式的建议,为防止匝道车辆呈车队形式进入主线,每个信号周期放行一辆机动车进入主线。BPB匝道控制策略的核心为其信号周期算法,同时还需要确定调整周期长度和模型预热时间。

#### 2.2.1 信号周期计算

BPB信号周期计算借鉴ALINEA策略的闭环控制思路,但又有所区别。ALIENA策略是根据实测占有率与目标占有率之差,在上一周期的信号控制方案的基础上进行周期调整。而BPB策略根据实测的上游主线流量、匝道流量计算拥堵概率,换算为新调整周期的计算信号周期后,再将上一周期的信号周期与计算信号周期按调和系数进行融合。

BPB匝道控制策略信号周期的计算见式(4)。

$$CT(t) = \begin{cases} CT_{cal}(t), & \text{if } CT(t-1) = 0; \\ K_1CT(t-1) + K_2CT_{cal}(t), & \text{else.} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $CT(t)$  为  $t$  时段的信号周期,  $s$ ;  $CT_{cal}(t)$  为  $t$  时段的计算信号周期,  $s$ , 见式(5);  $K_1$  和  $K_2$  为调和系数, 由交通仿真确定,  $K_1 + K_2 = 1$ .

$$CT_{cal}(t) = \begin{cases} 10, & 0 \leq \text{MaxRp} < 360; \\ \frac{3600}{\text{MaxRp}}, & 360 \leq \text{MaxRp} < 1800; \\ 0, & \text{MaxRp} \geq 1800. \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\text{MaxRp}$  为当前主线流量下, 拥堵概率等于临界拥堵概率的最大匝道流量, 辆/h, 见式(6).

当最大匝道流量超过 1800 辆/h 时, 若进行信号控制, 则每个信号周期不超过 2 s, 由于过短的信号周期不利于控制, 此时应关闭信号灯. 当最大匝道流量低于 360 辆/h 时, 为控制匝道上车辆排队回溯, 取最小调节率为 360 辆/h.

### 2.2.2 最大匝道流量拟合函数

拥堵概率为 0.2 时, 主线流量-匝道流量散点图如图 7 所示.

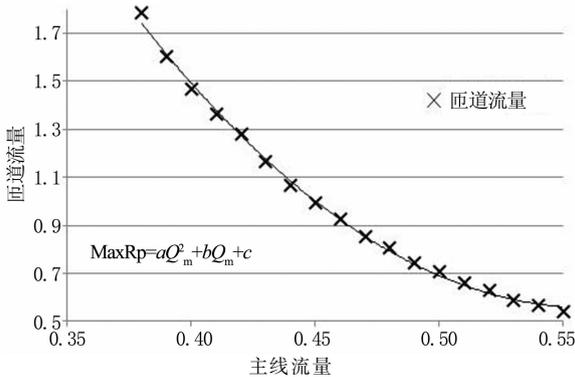


图7 临界拥堵概率下的主线流量-匝道流量图  
Fig.7 The graph of traffic and on-ramp volume under the maximum breakdown probability

采用二次函数拟合(如图 7 所示), 得到最大匝道流量  $\text{MaxRp}$  的计算公式:

$$\text{MaxRp} = \begin{cases} aQ_m^2 + bQ_m + c, & 0 < x < \frac{b}{2a}; \\ \frac{b^2 - 4ac}{4a^2}, & x > \frac{b}{2a}. \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $Q_m$  为主线流量;  $a, b, c$  为拟合系数, 通过回归计算获得. 当主线流量超过二次函数的最值点后, 取二次函数的最小值作为入口调节率.

### 2.2.3 调和系数的确定

调和系数用于确定前后信号周期的融合比例, 由式(4)可知:  $K_1$  越接近 1, 每次信号调整的幅度就越小, 对实时交通变化就越不敏感;  $K_1$  越接近 0, 每次信号调整的幅度就越大, 实时交通情况对信号周期的影响越大. 调和系数通过仿真试验获得, 调和系

数宜从  $K_1 = 0.4, K_2 = 0.6$ ;  $K_1 = 0.5, K_2 = 0.5$ ;  $K_1 = 0.6, K_2 = 0.4$  选取. 最佳调和系数应同时满足式(7)与式(8)的要求.

$$P_b(K_1, K_2)_i < 0.2, \quad (7)$$

$$Q(K_1, K_2) = \max \{Q(K_1, K_2)_i\}. \quad (8)$$

式中:  $P_b(K_1, K_2)_i$  为采用第  $i$  组调和系数仿真获得的拥堵概率;  $Q(K_1, K_2)$  为最佳调和系数仿真获得的合流流量;  $Q(K_1, K_2)_i$  为第  $i$  组调和系数仿真获得的合流流量.

### 2.2.4 调整周期长度

调整周期长度用于确定 2 次周期调整之间的时间间距. 调整周期越长, 则测得的交通流量换算为小时流量后越准确, 但信号周期会越难以反映实际交通情况; 调整周期越短, 信号周期变化越频繁, 但更能真实反映实际交通情况. 由于本文是根据每分钟的平均车速进行拥堵判断, 因此最长调整周期定为 60 s. 同时, 调整周期时长也不宜过短, 否则将导致换算得到的小时流量波动过大. 由式(5)可知, 一个信号周期最长为 10 s, 为保证一个调整周期的时长不小于一个信号周期, 最短调整周期不宜小于 10 s. 调整周期的计算可采用确定调和系数时使用的流量组合进行仿真运算, 当合流流量最大时, 即为计算值.

### 2.2.5 仿真预热时间

仿真预热时间需要根据路网中车辆从发生断面经最长路径离开模型区域所消耗的最长时间确定. 其计算公式如式(9)所示.

$$T_w = \frac{L}{V_{\min}}. \quad (9)$$

式中:  $T_w$  为模型的预热时间;  $V_{\min}$  为模型中自由流车辆可能出现的最慢速度,  $m/s$ ;  $L$  为模型中最长路径的长度,  $m$ .

BPB 匝道控制设计由 3 个模块组成: 仿真模型模块, 感应控制设计模块以及信号控制模块, 如图 8 所示.

该控制策略适用于满足以下情况的快速路入口匝道:

- 1) 容易发生规律性的或偶发性的交通拥堵;
- 2) 入口匝道为 1 车道;
- 3) 入口匝道有足够的长度储存排队车辆;
- 4) 快速路与匝道上有足够的空间安装车辆检测器、信号灯、提示标志等;
- 5) 具有重要意义的关键入口匝道, 如连接城市工业区或仓储区的入口匝道等.

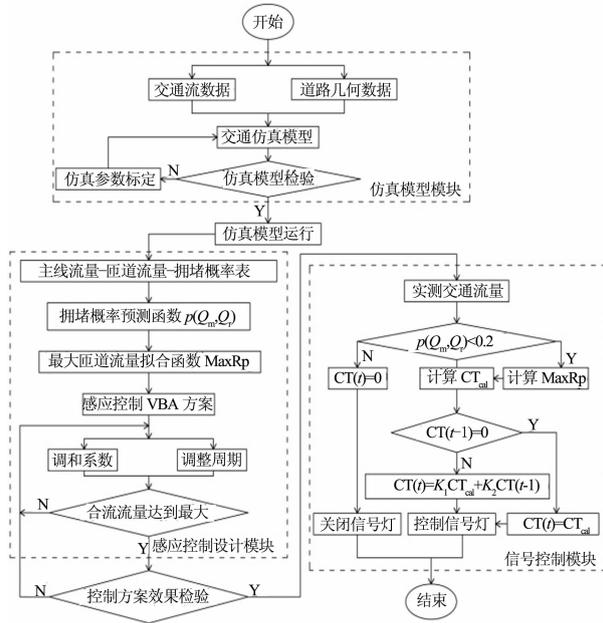


图 8 基于拥堵概率的匝道控制方案设计流程图

Fig. 8 Flow chart of the ramp's control scheme design under breakdown probability

### 3 BPB 匝道控制策略实例

某城市快速路合流区域仿真模型如图 9 所示。

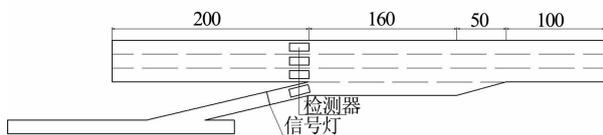


图 9 道路拓扑结构图

Fig. 9 Topology structure of expressway and ramp

对主线流量-匝道流量-拥堵概率表进行插值计算,获得临界拥堵概率时的主线流量与匝道流量.将数据归一化至区间[0,1]后按式(6)进行二次函数拟合,得到:

$$\text{MaxRp} = 36.27Q_m^2 - 40.67Q_m + 11.95. \quad (10)$$

根据式(9)计算模型预热时间:

$$\frac{510 \text{ m}}{30 \text{ km/h}} = 61.2 \text{ s}. \quad (11)$$

故模型预热时间不应小于 61.2 s,取预热时间为 120 s.

通过仿真试验,调和系数定为  $K_1 = 0.5, K_2 = 0.5$ ,调整周期定为 20 s. BPB 匝道控制策略参数见表 4.

表 4 BPB 入口匝道控制参数一览表  
Tab. 4 Parameters for BPB ramp metering

拥堵概率	$p = -17.14 + 7.734Q_m + 28.27Q_r - 1.053Q_m^2 - 7.66Q_mQ_r - 22.21Q_r^2 + 0.0039Q_m^3 - 0.1291Q_m^2 + 5.222Q_mQ_r^2 + 6.792Q_r^3 + 0.0988Q_m^3Q_r - 0.1509Q_m^2Q_r^2 - 1.058Q_mQ_r^3 - 0.5878Q_r^4$ ( $0 < Q_m < 5.7, 0 < Q_r < 1.9$ )
最大匝道流量函数	$\text{MaxRp} = 36.27Q_m^2 - 40.67Q_m + 11.95$
调和系数	$K_1 = 0.5, K_2 = 0.5$
调整周期	20 s

本文选取 2 种主线工况:1)主线中等流量;2)主线高流量,对比不同匝道流量时 3 种信号控制策略的拥堵概率、合流流量以及平均速度.

1)工况一主线中等流量:取主线流量 4 500 辆/h,对比需求-容量控制策略、无信号控制、BPB 信号控制策略的交通数据(表 5),合流流量的对比分析见图 10.

观察图 10, BPB 信号控制下的合流流量与无信号控制的合流流量基本持平,而 DC 信号控制下的合流流量小于 5 300 辆/h,不能满足流量需求.相比 DC 信号控制, BPB 信号控制能够更好地引导车辆合流.

表 5 中等流量信号控制合流对比表  
Tab. 5 Volume comparison under medium volume

匝道流量	无信号控制合流流量/(辆·h <sup>-1</sup> )	DC 信号控制合流流量/(辆·h <sup>-1</sup> )	BPB 信号控制合流流量/(辆·h <sup>-1</sup> )
900	5 365.20	5 274.88	5 353.25
1 000	5 466.24	5 269.88	5 453.88
1 100	5 567.16	5 288.38	5 547.63
1 200	5 630.16	5 283.00	5 636.50
1 300	5 686.44	—	5 702.00
1 400	5 728.92	—	5 737.13

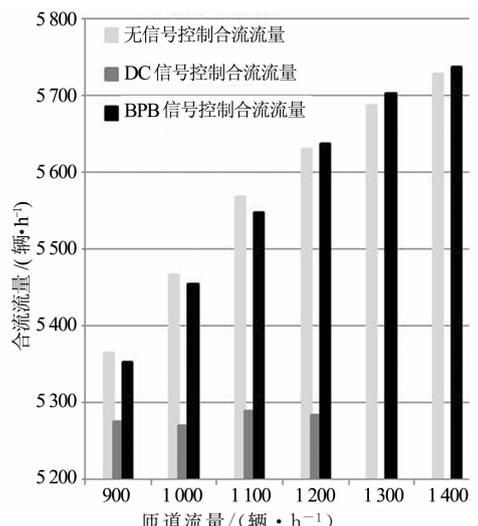


图 10 中等流量信号控制合流对比图  
Fig. 10 Volume comparison under medium volume

主线流量 4 500 辆/h 时,不同匝道流量对应的

主线平均车速与拥堵概率如图 11 所示。

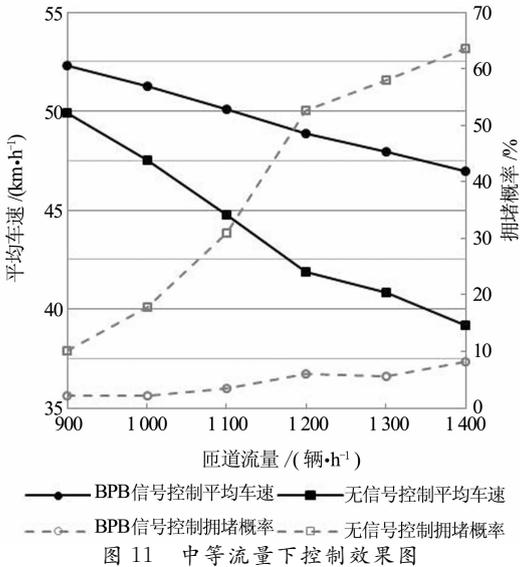


图 11 中等流量下控制效果图

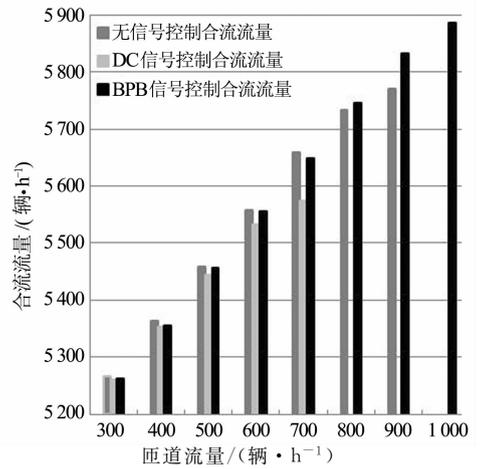


图 12 高流量信号控制合流流量对比图  
Fig. 12 Volume comparison under high volume

观察图 11, BPB 信号控制能够将拥堵概率控制在 10% 以内, 而无信号控制时拥堵概率随匝道流量的增加而迅速上升. 由此可见, BPB 匝道控制方案能够在中等主线流量的情况下将拥堵概率控制在可承受范围内. 图 11 中, 主线车速随匝道流量的增长而下降. 入口匝道采用 BPB 信号控制方案后, 主线车速受匝道流量的影响相对较小; 在相同匝道流量下, 主线车速较高, 如匝道流量为 1 400 辆/h 时, 无信号控制的主线速度仅为 39.18 km/h, 低于规范中的拥堵速度阈值(40 km/h), 而采用 BPB 信号控制后主线速度为 47.06 km/h, 比无信号控制时高 20.0%, 效果明显.

综上所述, BPB 信号控制策略能够在保持合流流量的同时, 大幅降低拥堵概率, 提高主线平均速度. 相比 DC 控制策略和无信号控制, BPB 信号控制后交通状态更为理想.

2) 工况二主线高流量: 主线流量为 5 000 辆/h 时, DC 控制策略、无信号控制、BPB 信号控制策略的交通数据见表 6, 合流流量的对比分析见图 12.

表 6 高流量信号控制效果对比表

Tab. 6 Comparison of signal control effect under high volume

匝道流量	无信号控制合流流量 / (辆·h <sup>-1</sup> )	DC 信号控制合流流量 / (辆·h <sup>-1</sup> )	BPB 信号控制合流流量 / (辆·h <sup>-1</sup> )
300	5 266.20	5 261.13	5 262.63
400	5 363.64	5 352.25	5 355.88
500	5 459.16	5 443.00	5 456.50
600	5 558.40	5 533.00	5 555.00
700	5 658.72	5 574.50	5 649.38
800	5 732.88	-	5 744.63
900	5 769.72	-	5 833.13

图 12 中, 3 种控制策略的合流流量在低匝道流量 (<600 辆/h) 时比较接近, 随着匝道流量的增长, 无信号控制及 DC 信号控制策略开始无法完成合流. 匝道流量达到 1 000 辆/h 时, 只有 BPB 信号控制策略能够满足合流需求.

主线流量 5 000 辆/h 时, 不同匝道流量对应的主线车速与拥堵概率如图 13 所示.

由图 13 可以看出, 采用 BPB 信号控制策略后, 拥堵概率控制在 10% 以内, 且合流区平均车速得到了提高. 无信号控制时, 匝道流量超过 600 辆/h 后, 拥堵概率急剧上升, 平均速度的下降加快. 而采用 BPB 信号控制策略后, 拥堵概率上升缓慢, 平均速度的下降得到了控制.

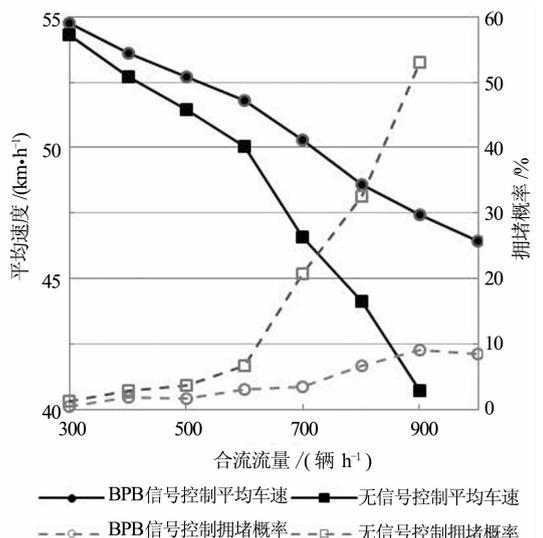


图 13 高流量下控制效果图  
Fig. 13 Control effect under high volume

由此可知, BPB 信号控制策略在高主线流量下, 仍能够很好地控制拥堵, 且能够更好地保持合流区车辆正常运行, 合流区域的主线速度达 45 km/h 以上。

## 4 结 论

1) 通过交通仿真得到主线流量、匝道流量与拥堵概率间的函数关系, 建立了主线流量与匝道流量的拥堵概率预测模型。

2) 采用闭环控制概念, 并设置临界拥堵概率, 设计了一种基于拥堵概率的城市快速路入口匝道信号控制策略。该控制策略通过收集实时交通流量, 预测拥堵概率, 再对比临界拥堵概率, 最后判断是否开启入口匝道控制系统。

3) 提出了基于拥堵概率的入口匝道控制方法, 确定了匝道信号系统的设计参数。

4) 研究表明, BPB 控制策略能够在满足合流区流量需求的同时, 降低拥堵的发生概率, 提高合流区的主线车速, 且其效果优于无信号控制以及 DC 控制策略。

5) 本文建立的拥堵概率函数适用于主线单向 3 车道, 设计速度 80 km/h 的快速路入口匝道, 未考虑前后出入口、主线弯道、匝道纵坡、放行方式等方面的影响, 宜作进一步的研究。

## 参考文献

- [1] 胡灵龙, 王绍楠, 孙伟力, 等. 考虑环境效益的城市快速路匝道协调控制[J]. 江南大学学报: 自然科学版, 2013, 12(5): 522—527.  
HU Linglong, WANG Shaonan, SUN Weili, *et al.* Coordinated ramp metering of urban expressway considering environment benefits[J]. Journal of Jiangnan University: Natural Science Edition, 2013, 13(5): 522—527. (In Chinese)
- [2] 刘兰, 孙剑, 李克平. 城市快速路入口匝道速度控制研究[J]. 交通信息与安全, 2011, 29(3): 15—19.  
LIU Lan, SUN Jian, LI Keping. On-ramp speed control of urban expressway[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2011, 29(3): 15—19. (In Chinese)
- [3] 聂磊, 杨晓光, 杨晓芳, 等. 上海快速路入口匝道单点控制策略仿真评价研究[C]//第一届中国智能交通年会论文集. 上海: 同济大学出版社, 2005: 610—618.  
NIE Lei, YANG Xiaoguang, YANG Xiaofang, *et al.* Research on evaluation of expressway ramp isolated metering strategy in Shanghai[C]//Proceedings of the 1st China ITS Annual Meeting. Shanghai: Tongji University Press, 2005: 610—618. (In Chinese)
- [4] JACOBSON L, STRIBIAK J, NELSON L, *et al.* Ramp management and control handbook[R]. Washington, DC: Federal Highway Administration, 2006: 77—96, 115—130.
- [5] 郑建湖, 董德存, 陈洪. 城市快速路入口匝道控制策略比较分析[J]. 计算机测量与控制, 2006, 14(2): 196—199.  
ZHENG Jianhu, DONG Decun, CHEN Hong. Comparative analysis on on-ramp control strategies of urban freeway[J]. Computer Measurement & Control, 2006, 14(2): 196—199. (In Chinese)
- [6] HADJ-SALEM H, BLOSSEVILLE J M, PAPAGEORGIU M. ALIENA: a local feedback control law for on-ramp metering; a real study[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Road Traffic Control. London: ARRB Group Limited, 1990: 194—198.
- [7] 郝媛, 孙立军, 徐天东, 等. 城市快速路交通拥挤分析及拥挤阈值的确定[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 36(5): 609—614.  
HAO Yuan, SUN Lijun, XU Tiandong, *et al.* Analysis of traffic congestion on urban expressway and congestion threshold identification[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(5): 609—614. (In Chinese)
- [8] 高万宝, 吴坚, 邹娇. 基于实时密度的入口匝道控制算法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2012, 12(2): 150—155.  
GAO Wanbao, WU Jian, ZOU Jiao. On-ramp metering algorithm based on real-time density[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2012, 12(2): 150—155. (In Chinese)
- [9] BRILON W, GEISTEFELDT J, REGLER M. Reliability of freeway traffic flow: a stochastic concept of capacity[C]//Proceedings of the 16th International Symposium on Transportation and Traffic Theory. Maryland: University of Maryland, 2005: 125—144.
- [10] KONDYLI A, ELEFTERIADOU L, BRILONET W, *et al.* Development and evaluation of methods for constructing breakdown probability models[J]. Journal of Transportation Engineering, 2013, 139(9): 931—940.
- [11] CJJ 129—2009 城市快速路设计规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 20—24.  
CJJ 129—2009 Specification for design of urban expressway [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009: 20—24. (In Chinese)
- [12] 赵春, 王炜, 李文权. 主路不同流量条件下入口匝道通行能力研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(2): 82—85.  
ZHAO Chun, WANG Wei, LI Wenquan. On-ramp capacity under different flow rate of major stream[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(2): 82—85. (In Chinese)