

# 基于动态归类技术的交通流实时运营风险评价

蒋锐, 郭忠印

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 基于车辆间直接影响和状态传递的特征, 提出用以辨识交通流各向异性和运动差异性的动态归类技术. 基于车辆微观运动特征和车辆间的相互影响, 提出考虑危险情形的交通流运营风险矩阵和状态关联矩阵. 制定交通流运营风险的等级判别标准, 构建交通流的实时运营风险指数模型. 选取某高速公路事故多发路段进行试验, 结果表明交通流的运营风险指数与历史交通事故数存在良好的关联性.

**关键词:** 交通流安全; 各向异性; 状态传递; 动态归类; 交通流风险评价

**中图分类号:** U 491.2, U 492.8

**文献标识码:** A

## Dynamic-classified Method-based Real-time Risk Audit of Traffic Flow

JIANG Rui, GUO Zhongyin

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

**Abstract:** Considering the characteristics of direct-effect and state-transfer among vehicles, the dynamic-classified method is first put forward to discriminate anisotropic and diversity of traffic flows. Based on vehicle travelling characteristics and inter-vehicles force, matrixes of related-state and traffic risk are introduced to analyze dangerous condition. Real-time risk index is then set up after constituting traffic flow risk-grades. Experiments on some freeway sections of high-frequency accident validate the relation between traffic flow risk index and historical accidents.

**Key words:** traffic flow safety; anisotropy; state-transfer; dynamic classification; traffic flow risk audit

随着智能交通和计算机技术的快速发展, 现代交通安全管理技术逐渐向智能化、信息化和实时化

等方向发展. 目前, 我国在高等级公路和城市道路上投入大量的视频监控、交通检测器等交通安全设施, 实现了实时监控、交通检测等功能, 但在实时交通信息的有效利用方面尚存在不足. 通常, 交通实时检测的目的首先是保障交通的安全运营, 其次是提高道路的通行效率<sup>[1]</sup>. 然而, 由于缺乏实时交通流安全分析理论的研究, 导致目前我国的道路安全管理滞后于实时交通状况. 20世纪90年代, 美国、加拿大等逐渐开展了交通流的安全评价研究, 主要集中在事故的检测算法、事故与交通流特征参数的关系、事故前的交通流预兆特征等方面<sup>[2-4]</sup>. 其中, 克里斯·李以检测区段上下游的车速差、断面车速方差、不同车道的车速协方差等风险预兆因子, 作为交通流实时风险判别的表征因子<sup>[4]</sup>, 该成果于2006年被美国堪萨斯州公路部门借鉴. 然而, 该方法主要不足之处是风险原因的未知性和风险等级判别的主观性, 其科学性有待进一步检验. 因此, 基于目前实时交通流安全研究中存在的问题, 以及现实中智能交通安全管理的运用需求, 进行了交通流实时运营风险的研究, 重点解决以下两个关键问题: 一是交通流运营状态差异性的判别方法; 二是交通流运营风险评价模型的构建与验证.

## 1 动态归类法

交通流是将道路上车流的运动近似于液体的流动, 其等效的两个重要前提条件是假设车流的各向同性(即前车和后车的相互影响是等效的)和均质性(即车流是由同一类型的车辆组成). 然而, 现实中运营的交通流存在着各向异性(即前车对后车的影响大于后车对前车的影响)和非均质性(即车流是由不

收稿日期: 2010-04-01

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2007AA11Z235); “十一五”国家科技支撑计划(2009BAG13A02)

第一作者: 蒋锐(1979—), 男, 工学博士, 主要研究方向为道路安全工程. E-mail: locate\_jiang@126.com

通讯作者: 郭忠印(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路安全工程. E-mail: zhongyin@tongji.edu.cn

同运动特性的车辆组成),而这两个特性差异则是交通流运营风险存在的最根本原因.由此可见,交通流实时运营风险评价的关键技术是交通流运营状态差异化的判别方法.

### 1.1 问题提出

通常采用均值法、移动平均法等传统数理统计方法对交通流的状态参数进行分析,如车流的平均车速、85%位车速等.该类方法能获取交通流运营状态的总体特征,但在一定层面上忽略了车辆个体的相互影响特征,不利于辨识实时交通流运营中存在的危险状态,例如前后两辆车的车头时距为5 s,第一种情形中前车速度为 $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,后车速度为 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,那么后车行驶约42 m后就能超越前车,前车的运动状态对后车产生影响;而第二种情形中前车速度为 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,后车速度为 $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,那么由于前车车速比后车车速大,车辆间距随时间逐渐增大,车辆间的相互影响则越来越小.如果采用均值法或移动平均法,那么两种情形的平均速度都为 $85 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,车速差为 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,这就混淆了两种不同运营状态的危险性.可见,仅以车速的大小并不能完全反映交通流所处的危险状态,因此提出交通流的动态归类技术,其核心是以检测区段内车辆间是否发生相互影响为归类依据,目的是明

晰车辆的运动状态及可能存在的风险.

目前,交通流的微观安全研究思路分为两大类:第一类是欧拉法思想,即研究断面交通参量与交通事故的关系,如断面车速、车速方差等指标,但该类指标仅反映车辆的瞬间状态特征;第二类是拉格朗日法思想,即研究车辆的行驶特征变化,如车速和加减速的连续变化特征等指标,而该类指标只反映单辆车的连续运动特征.基于上述两种研究思想各自存在的优缺点,结合车辆的实际运动特征,提出分区段的状态归类研究思路,即以一定长度区间内的交通流为研究对象,假设车辆在该区间上行驶车速不发生急剧变化(或短时间内速度变化小),通过动态归类和状态推测的方法,分析不同车辆在区间内的行驶状态及状态冲突问题,从而整合欧拉法和拉格朗日法的研究思想,判别车辆在道路区间内可能存在的运营风险.

### 1.2 模型构建

以车辆间在道路区段内是否存在相互影响为动态归类依据,提出行驶状态归类和状态传递归类法则.假设区段内有 $n$ 辆车(见图1),依据车辆经过上游检测器的时间先后顺序,分别定义为车辆1,车辆2,……由于存在不同数量的车辆,故以车辆 $i$ 表示前车,车辆 $j$ 表示后车,便于通用模型的推导.

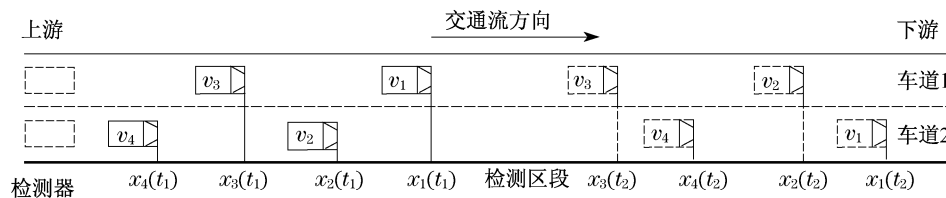


图1 检测区段内交通流运动状态示意图

Fig.1 Vehicle operation in the road section of traffic detection

#### 1.2.1 第一动态归类法则——行驶状态归类(直接归类)

当后车 $j$ 与前车 $i$ 发生相互影响时有以下两种可能性:①后车 $j$ 不能超越前车 $i$ ,但后车 $j$ 在前车 $i$ 的影响范围 $L_r$ 内,其参量关系见公式(1);②后车 $j$ 能在区段内超越前车 $i$ ,其参量关系见公式(2).

$$\begin{cases} \frac{v_i h_{j-i}^s}{3.6} + \frac{v_i t_j}{3.6} - \frac{v_j t_j}{3.6} \leq L_r \\ h_{j-i}^s < \frac{3.6L_c}{v_i} - t_j \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{3.6L_c}{v_j} + h_{j-i}^s < \frac{3.6L_c}{v_i} \quad (2)$$

式中: $v_i$ 和 $v_j$ 分别为前车 $i$ 和后车 $j$ 的车速, $\text{km} \cdot$

$\text{h}^{-1}$ ;  $h_{j-i}^s$ 为经过上游时后车 $j$ 与前车 $i$ 的实际车头时距, $s$ ;  $t_j$ 为车辆 $j$ 在区段的行程时间, $s$ ;  $L_r$ 为车辆间相互影响的距离,取值125~150 m;  $L_c$ 为区段长度, $m$ .

整理上述不等式组,可得直接归类的车头时距判别模型为

$$0 \leq h_{j-i}^s \leq \frac{3.6L_r}{v_j} + \frac{3.6L_c(v_j - v_i)}{v_i v_j} \quad (3)$$

#### 1.2.2 第二动态归类法则——状态传递归类(间接归类)

通常,影响分为直接影响和间接影响.第一动态归类标准界定了直接影响的车辆能否归类的标准,属于直接影响归类;而间接影响归类则采用状态传

递归判断标准,例如车辆1影响车辆2,车辆2影响车辆3,那么车辆1与车辆3存在着间接影响,应将车辆1、车辆2和车辆3都归为同类影响车流.状态传递归类的理论依据是跟车行驶的传递性和变换车道行驶的扰动性,判别依据为车辆在区段内的行程时间.

## 2 交通流运营风险分析

### 2.1 交通流运营风险指数

交通流运营风险指数(traffic flow risk index, TFR)表征相互影响车辆的运营状态及状态危险度,包含车辆间的关联度  $\mathbf{R}_k^n$  和风险度  $\mathbf{W}_k^n$  两方面,评价同类交通流在道路区段内的运营风险,表达式为

$$\mathbf{I}_{\text{TFR}}(k, n) = (\mathbf{R}_k^n \times \mathbf{W}_k^n) = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_k^1 \times (\mathbf{B}_k^1)^T \\ \mathbf{A}_k^2 \times (\mathbf{B}_k^2)^T \\ \vdots \\ \mathbf{A}_k^n \times (\mathbf{B}_k^n)^T \end{pmatrix}_{n \times 1} = \begin{pmatrix} r_{11} \omega_{11} + r_{12} \omega_{12} + \cdots + r_{1n} \omega_{1n} \\ r_{21} \omega_{21} + r_{22} \omega_{22} + \cdots + r_{2n} \omega_{2n} \\ \vdots \\ r_{n1} \omega_{n1} + r_{n2} \omega_{n2} + \cdots + r_{nm} \omega_{nm} \end{pmatrix}_{n \times 1} \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{I}_{\text{TFR}}(k, n)$  为包含  $n$  辆车的第  $k$  类交通流的运营风险指数;  $\mathbf{R}_k^n$  为第  $k$  类交通流  $n$  辆车之间的状态关联矩阵;  $\mathbf{W}_k^n$  为对应状态的交通流运营风险矩阵;  $\mathbf{A}_k^n$  为第  $n$  辆车与其他车辆的状态关联因子;  $\mathbf{B}_k^n$  为第  $n$  辆车在其他车辆影响下的风险度;  $r_{12}$  为第1辆车与第2辆车的状态关联因子;  $\omega_{12}$  为第1辆车在第2辆车的影响下的风险度;其他符号意义以此类推.

### 2.2 交通流状态关联矩阵

相互影响车辆间都存在着“影响力”,该影响力反映车辆间的关联性,以状态关联矩阵表示车流间的这种影响关系,即  $n$  辆车的状态关联矩阵为  $n \times n$  的矩阵.考虑交通流各向异性的特性,即前车  $i$  对后车  $j$  存在影响,反之则不存在影响,可知实际交通流的状态关联矩阵  $\mathbf{R}_k^n$  应为下三角矩阵

$$\mathbf{R}_k^n = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ r_{21} & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & r_{j-1} & \cdots & 0 \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & 1 \end{pmatrix}_{n \times n} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_k^1 \\ \mathbf{A}_k^2 \\ \vdots \\ \mathbf{A}_k^n \end{pmatrix}_{n \times 1} \quad j > i \quad (5)$$

式中:  $r_{ii}$  为车辆  $i$  的自相关状态关联因子,定义为1;其他符号意义同上.

第一类直接归类的状态关联因子为

$$r_{j-i} = \begin{cases} \delta_{j-i} & h_{j-i}^s \leq \frac{3.6L_r}{v_j} + \frac{3.6L_c(v_j - v_i)}{v_i v_j} \\ 0 & h_{j-i}^s > \frac{3.6L_r}{v_j} + \frac{3.6L_c(v_j - v_i)}{v_i v_j} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\delta_{j-i}$  为后车  $j$  和前车  $i$  的车道位置差,  $\delta_{j-i} =$

$$\begin{cases} 1 & |\delta_j - \delta_i| = 0 \\ 0.2 \sim 0.5 & |\delta_j - \delta_i| = 1, \text{其中, } \delta_i \text{ 和 } \delta_j \text{ 为前车 } i \\ 0 & |\delta_j - \delta_i| > 1 \end{cases}$$

和后车  $j$  的车道位置因子,由中央分隔带往路肩方向车道位置因子  $\delta$  依次定义为  $1, 2, \dots$ ;  $\delta_{j-i} = 0.2 \sim 0.5$  表示相邻车道上车辆的弱关联性;其他符号意义同上.

第二类间接归类的状态关联因子:假设前车  $i$  和后车  $j$  之间存在着车辆  $i+1, \dots, j-1$ ,那么可得

$$r_{j-i} = \frac{r_{i+1} + r_{i+1, i+2} + \cdots + r_{j-2, j-1} + r_{j-1, j}}{j - i} \quad i < i+1 < i+2 \cdots < j-2 < j-1 < j \quad (7)$$

式中:  $r_{i+1}$  为车辆  $i$  与车辆  $i+1$  之间的状态关联因子;其他符号意义以此类推.

### 2.3 交通流运营风险矩阵

交通流运营风险矩阵  $\mathbf{W}_k^n$  表示第  $k$  类交通流  $n$  辆车的运营状态风险性,其表达式为

$$\mathbf{W}_k^n = \begin{pmatrix} \omega_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ \omega_{21} & \omega_{22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \omega_{j-i} & \cdots & \vdots \\ \omega_{n1} & \omega_{n2} & \cdots & \omega_{nm} \end{pmatrix}_{n \times n} = \begin{pmatrix} \mathbf{B}_k^1 \\ \vdots \\ \mathbf{B}_k^j \\ \mathbf{B}_k^n \end{pmatrix}_{n \times 1} \quad (8)$$

式中:  $\omega_{j-i}$  为在前车  $i$  影响下后车  $j$  的运营风险值,

$$\omega_{j-i} = \begin{cases} \chi_{j-i}^g & h_{j-i}^s \leq \frac{3.6L_r}{v_j} + \frac{3.6L_c(v_j - v_i)}{v_i v_j} \\ \chi_j^f & h_{j-i}^s > \frac{3.6L_r}{v_j} + \frac{3.6L_c(v_j - v_i)}{v_i v_j} \end{cases}, \chi_{j-i}^g \text{ 为}$$

在前车  $i$  影响下后车  $j$  的风险值,为跟车或变换车道风险;  $\chi_j^f$  为后车  $j$  不受其他车辆影响的风险值,即自由行驶风险;  $\mathbf{B}_k^j$  为后车  $j$  受其他车辆影响的运营风险值.

### 2.4 运营风险等级划分

交通流的运营风险由车辆个体所处的交通状态,以及该状态下可能造成的后果严重性决定.依据

紧急制动情形下,不同运行车速对驾乘人员可能造成的伤害量化自由行驶风险;以安全车头时距与实际车头时距的差值,作为跟车行驶或变换车道行驶的风险判别依据,不同状态的运营风险等级分类见表1<sup>[5]</sup>.其中,采用线性内插法对同一级别内的运营

风险进行差异量化.由表1可知,交通流风险指数分为六级水平,一级至六级的风险指数表征由低至高的交通流运营风险,即风险指数越大,那么车辆行驶的危险性也越大.

表1 不同运行状态下高速公路的交通流运行风险等级和阈值<sup>[5]</sup>

Tab.1 Operation risk grade and value of freeway traffic flows in different travel states

自由行驶风险	自由行驶车辆的运行车速 $v / (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$					
	$\geq 120$	110~120	100~110	80~100	60~80	$< 60$
跟车行驶风险或 变换车道行驶风险	实际车头时距与安全车头时距的差值 $\Delta h / \text{s}$					
	$\leq 1$	1~2	2~3	3~4	4~5	—
运营风险的等级	一级	二级	三级	四级	五级	六级
运营风险值 $I_{\text{TR}}$	0.8~1.0	0.6~0.8	0.4~0.6	0.3~0.4	0.2~0.3	0.1~0.2

(1) 跟车行驶安全车头时距和实际车头时距计算<sup>[5-6]</sup>:

依据后车  $j$  和前车  $i$  的车速,结合路面条件和能见度,求得后车  $j$  的跟车最小车头时距  $\hat{h}_{j-i}^{\text{cf},\text{m}}$  为

$$\hat{h}_{j-i}^{\text{cf},\text{m}} = \frac{v_j^2/v_i - v_j}{70.56(\mu_1 \pm b)} + \frac{v_j(\tau_s + \tau_w)}{v_i} + \frac{3.6L}{v_i} - \left( \frac{3.6L_c}{v_i} - \frac{3.6L_c}{v_j} \right) \quad (9)$$

式中:  $\tau_s$  为视距良好下正常驾驶反应时间,取值为 0.4~1.5 s;  $\tau_w$  为雾天驾驶反应延迟时间,取值 3~5 s;  $L$  为安全停车距离,取值 9~11 m;  $\mu_1$  为路面纵向附着系数;  $b$  为路线纵坡;其他符号意义同上.

后车  $j$  与前车  $i$  的最小实际车头时距  $h_{j-i}^{\text{cf},\text{m}}$  为

$$h_{j-i}^{\text{cf},\text{m}} = h_{j-i}^{\text{s}} - \left( \frac{3.6L_c}{v_i} - \frac{3.6L_c}{v_j} \right) \quad (10)$$

那么,在前车  $i$  的影响下后车  $j$  跟车行驶的车头时距差  $\Delta h_{j-i}^{\text{cf}}$  为

$$\Delta h_{j-i}^{\text{cf}} = h_{j-i}^{\text{cf},\text{m}} - \hat{h}_{j-i}^{\text{cf},\text{m}} \quad (11)$$

(2) 换车道行驶安全车头时距和实际车头时距计算<sup>[5-6]</sup>:

依据后车  $j$  车速与目标车道的平均车速,求得

后车  $j$  变换车道所需的最小安全车头时距  $\hat{h}_{j-d}^{\text{lc},\text{m}}$  为

$$\hat{h}_{j-d}^{\text{lc},\text{m}} = \frac{v_j^2/\bar{v}_d - \bar{v}_d}{70.56(\mu_1 \pm b)} + \frac{v_j(\tau_s + \tau_w)}{\bar{v}_d} + \frac{3.6L}{\bar{v}_d} + \frac{3.6R}{v_j} \arccos\left(\frac{R - 0.75\lambda W_1}{R}\right) \quad (12)$$

式中:  $\bar{v}_d$  为目标车道的平均车速,  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $R$  为抗侧滑的最小曲线半径,  $R = v_j^2/127(\mu_s + e)$ ,  $\mu_s$  为路面横向附着系数,  $e$  为路面超高;  $\lambda$  为后车  $j$  变换车道次数;  $W_1$  为车道宽度, m.

后车  $j$  变换车道时目标车道的实际车头时距  $\bar{h}_{j-d}^{\text{lc},\text{m}}$  为

$$\bar{h}_{j-d}^{\text{lc},\text{m}} = \begin{cases} (\sum_1^p h_{p-p-1}^{\text{s}})/p & p \geq 2 \\ h_{p-j}^{\text{s}} & p < 2 \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $p$  为目标车道车辆数.

那么,在前车  $i$  的影响下后车  $j$  变换车道的车头时距差  $\Delta h_{j-d}^{\text{lc}}$  为

$$\Delta h_{j-d}^{\text{lc}} = \bar{h}_{j-d}^{\text{lc},\text{m}} - \hat{h}_{j-d}^{\text{lc},\text{m}} \quad (14)$$

## 2.5 运营风险评价流程

运营风险评价流程见图2.

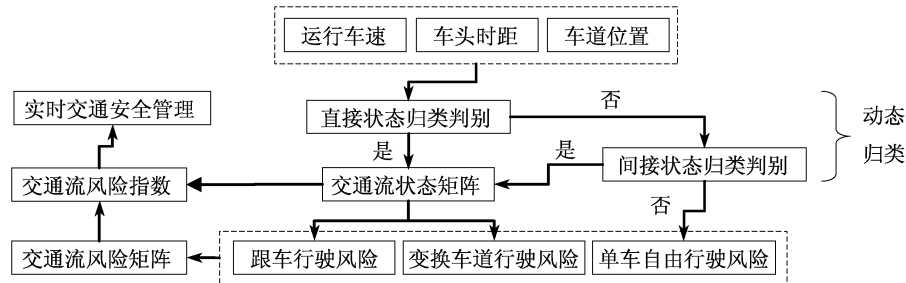


图2 基于动态归类法的交通流实时运营风险评价流程图

Fig.2 Risk audit flow chart of real-time traffic flows based on the dynamic classified method

### 3 实例分析

采用4台激光测速仪和摄像机实测某高速公路事故多发路段,共16个连续断面,采集车速、车头时距和车道位置等参数,每组检测的车辆不少于500辆,结合历史事故数和风险等级进行分析,见图3,4.

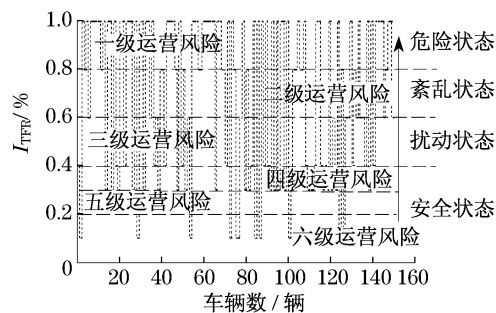


图3 某高速区段上连续150辆车的运营风险

Fig. 3 150 vehicle risks index in a freeway section

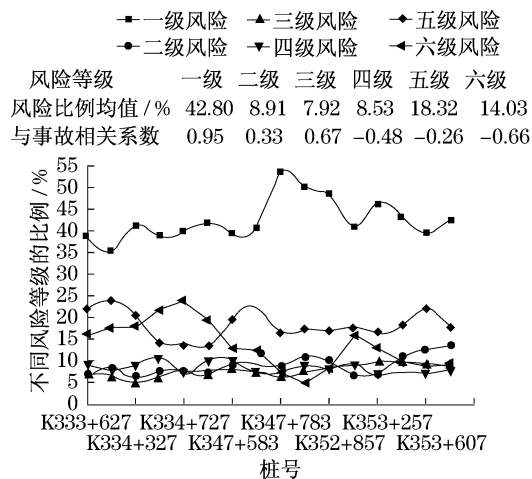


图4 某高速公路事故多发段的交通流实时运营风险

Fig. 4 Real-time risk in a freeway section of high-frequency accident

从图3,4可以看出,交通流风险指数能表征依次进入检测区段内车辆的运营风险大小.一级、二级和三级的运营风险与事故数之间存在正相关性,其中一级风险的相关性最高,可见这三个等级风险能反映交通流的运营安全性,故分别定义为交通流的扰动状态、紊乱状态与危险状态.而四级、五级和六级的运营风险与事故数之间存在负相关性,表明这三个等级风险下交通流处于安全运营状态;其中,六级与事故数的负相关系数最大,约为0.66,即六级为最安全的交通流状态,符合实际交通流的运营状况.实验表明,运营风险评价模型能反映交通流的实时

运营风险,能为实施及时的交通安全管理对策提供科学的理论依据.

### 4 结论

(1) 整合欧拉法思想和拉格朗日法思想的优点,基于车速无急剧变化的合理假设,以不同行驶状态的车辆能否发生直接或间接影响为依据,首次提出动态归类技术,解决交通流差异化辨识的关键问题.

(2) 依据车辆相互制约的“影响力”,提出交通流状态关联矩阵,表征车辆间相互影响的强弱态势;以车辆的基本运动形态和不同状态下可能的危险为依据,建立运营风险矩阵和交通流运营风险指数模型.

(3) 实验研究表明,交通流的运营风险指数与交通事故存在着较高的相关性,一级运营风险能表征交通流的危险状态,而六级运营风险则能显示交通流的安全状态,可为道路的智能交通安全管理提供依据.

### 参考文献:

- [1] 郭忠印,方守恩. 道路安全工程[M]. 北京:人民交通出版社,2003.  
GUO Zhongyin, FANG Shouen. Road safety engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [2] Thomas F Golob, Wilfred W Recker. A method for relating type of crash to traffic flow characteristics on urban freeways[J]. Transportation Research Part A, 2004, 38(8): 53.
- [3] Weil R, Wootton J, Garcia-ortiz A. Traffic incident detection sensors and algorithms[J]. Mathematics Computer Modeling, 1998, 27(9): 257.
- [4] Lee Chris Choongho. Proactive vehicle crash prevention on instrumented freeways using real-time traffic control [D]. Ontario: The University of Waterloo. School of Civil Engineering, 2004.
- [5] 同济大学交通运输工程学院. 基于事件的重大公路交通基础设施运营风险评价[R]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2010.  
College of Transportation Engineering of Tongji University. Risk analysis of road magnitude infrastructure affected by incidents [R]. Shanghai: Tongji University. College of Transportation Engineering, 2010.
- [6] 蒋锐,郭忠印,孔令旗. 基于碰撞约束的换车道安全分析[J]. 华东交通大学学报, 2009, 26(3): 24.  
JIANG Rui, GUO Zhongyin, KONG Lingqi. Safety analysis of lane changing based on vehicle-crashed restrictions [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2009, 26(3): 24.