

# 公路隧道群追尾交通事故预警模型

易富君<sup>1,2</sup>, 韩直<sup>2</sup>, 邓卫<sup>1</sup>

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 招商局重庆交通科研设计院有限公司 重庆 400068)

**摘要:** 由于公路隧道群追尾交通事故与车辆行驶过程中的运行状态密切相关, 将车辆制动距离、行驶速度、车辆类型等交通流参数作为其识别预警特征参量, 结合人工免疫系统原理, 构建了智能化的公路隧道群追尾交通事故预警模型, 能够对车辆异常状态的发展趋势做出较为准确的判断, 并给出相应事故安全级别的预警信息. 最后, 以西汉高速公路隧道群区段为例, 运用该基于人工免疫机理的预警模型进行工程实例仿真分析, 得出了不同工况下的预警事故信息, 说明了预警模型的准确性和可行性, 为我国高速公路隧道群区段的安全运营管理提供了重要的理论依据.

**关键词:** 公路隧道群; 追尾交通事故预警; 人工免疫; 改进否定算法

**中图分类号:** U 491

**文献标识码:** A

## An Early-warning Model for Rear-end Accident Occurring in Highway Tunnel Group

YI Fujun<sup>1,2</sup>, HAN Zhi<sup>2</sup>, DENG Wei<sup>1</sup>

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Merchants Chongqing Communications Research & Design Institute Co. Ltd., Chongqing 400067, China)

**Abstract:** Considering the close relationship between rear-end accident and the vehicle's travelling state in highway tunnel group, this paper takes braking distance, travelling speed and the type of vehicle as characteristic parameters for forewarning the rear-end accidents occurring in highway tunnel group. Then, on the basis of artificial immune mechanism, an early-warning model is proposed to identify and determine the tendency caused by vehicle's abnormal state, and some important early-warning information is given as the levels of accidents. Finally, Xihan highway tunnel group is studied as a simulation example to verify the accuracy and utility of the early-warning model. It is expected that the findings from the study can provide a significant theoretical

basis for the safety operation management in highway tunnel group.

**Key words:** highway tunnel group; early-warning of rear-end accident; artificial immune; improved negative algorithm

我国高速公路隧道群区段由于隧道密集、隧道间距短, 在较短的空间内频繁改变行驶环境, 从心理及生理上都对驾驶员造成很大影响, 使得隧道群区段的事故发生频率、事故的严重性及造成的交通延滞性又要高于一般的单体长大隧道. 笔者调研分析西汉高速公路隧道群区段样本交通事故资料显示, 其中追尾交通事故最为常见, 占总事故数的比率达到了 22.4%. 因此本文针对此类事故开展了基于改进否定算法的预警模型研究, 构建了一个以追尾交通事故识别警报为导向, 以追尾交通事故免疫为目的的预警新体系.

## 1 公路隧道群交通事故预警基础理论

交通事故预警检测技术可分为非自动检测技术和自动检测技术两类. 根据检测方法原理不同, 国内外早期出现的具有代表性的经典自动检测算法主要有加利福尼亚算法和突变理论算法, 这两者常被用作其他新开发的自动检测算法的性能比对分析<sup>[1-2]</sup>.

查阅已有检测算法研究成果, 总结尚存问题如下<sup>[3-4]</sup>: (1) 大多数预警检测算法属于理论性研究成果, 其自行设计了研究范围, 工程实践应用较少; (2) 部分算法由于数据采集成本高或采集方式不易实现, 使得交通管理部门不愿采用该理论或算法进行交通事故检测; (3) 目前检测算法大多存在阈值标定比较困难、误警率高、可移植性和自适应性较差等缺

收稿日期: 2010-09-16

基金项目: 西部交通建设科技项目(2008-318-740-014), 国家科技支撑计划项目(2009BAG13A02)

第一作者: 易富君(1983—), 男, 博士生, 主要研究方向为交通运输工程, E-mail: yifujun@cqjky.com

点.为了弥补传统检测算法部分固有的缺陷,本文对人工免疫系统中常用的否定算法进行了改进,可以有效提高追尾交通事故检测率和预警准确率,促进公路隧道交通事故智能化预警技术研究的发展.

### 1.1 追尾交通事故预警流程分析

公路隧道群追尾交通事故与车辆在隧道行驶过程中的运行状态密切相关,探究其直接原因主要是由于车辆行驶速度过快、制动距离不够所致.因此,本文将车辆在公路隧道群行驶过程中,受到某些因素影响而导致的异常行驶速度或者出现的异常制动距离作为识别信息.首先通过检测设备获取原始交通信息数据,然后经过预处理将需要的特征参量数据输入识别诊断系统,判别交通流是否会出现追尾交通事故,其次根据诊断结果报告追尾交通事故的严重级别,再进入对策库系统,根据诊断结果的不同采取相应的管理措施.整个预警流程与人工免疫系统的识别过程“抗原→产生抗体→结合抗原消除病毒”颇为相似.

### 1.2 追尾交通事故预警标准分析

根据公路隧道群交通事故识别特征数据需满足直观性、可获取性的原则,本文选取车辆制动距离、行驶速度、车辆类型作为追尾交通事故识别特征参量.制动距离采用车辆之间的最小安全距离  $L_s$  作为判别标准;行驶车速采用公路隧道群期望行驶平均车速  $V_q$  及实际平均行驶速度  $V_m$  作为判断标准;车辆长度主要分为大型车辆长度  $l_d$  和小型车辆长度  $l_x$  两种,其中制动距离作为主要识别交通参量,行驶速度及车辆长度作为辅助识别交通参量,具体判别标准见表 1.(由于篇幅有限,交通特征参量标准确定流程在此略去).

表 1 公路隧道群追尾交通事故初始化判断标准

Tab.1 Initialized judgment standard of highway tunnel group rear-end collision traffic accident

追尾交通事故类型	警度	制动距离 $L$	行驶速度 $V$	异常车辆长度
危险事故	重警	$L < L_s$	$V < V_q$	$l_d, l_d$
应急事故	中警	$L < L_s$	$V_q \geq V > V_m$	$l_d, l_x$
一般事故	轻警	$L < L_s$	$V \leq V_m$	$l_d, l_x; l_x, l_x$
安全状态	安全	$L \geq L_s$		

## 2 公路隧道群追尾交通事故预警模型

### 2.1 人工免疫预警基本原理

1986 年, Farmer 等免疫理论学者率先基于免疫

网络的相关研究成果提出了免疫系统的动态模型,并探讨了免疫系统与其他人工智能方法的联系,开创了人工免疫系统研究的先河<sup>[5-6]</sup>. 本文将公路隧道群追尾交通事故预警系统看作一个生命体,并借鉴人工免疫原理设计了追尾交通事故识别预警机制,考虑到功能的相似性,选择否定选择算法作为建立预警模型的基本算法.由于传统的否定选择算法具有数据编码不适应、预警模式单一、检测器重叠及对异常的变异体和新的异常检测效果不好等问题<sup>[7-8]</sup>.

本文应用否定选择算法对公路隧道群追尾交通事故识别预警模型进行了改进,使生成的检测器重叠减少,并扩大了检测器的覆盖空间,提高了对已知非安全状态和未知非安全状态的识别检测率.改进思想主要体现在以下两个步骤:

步骤 1:对检测器集  $R$  进行约简和聚类,通过产生与自体空间  $S$  不相匹配的所有检测器集合  $R$ ,使检测器集合不能检测自体空间,只能捕获非自体空间的特征,然后将检测器集合  $R$  与病态模式空间的各种病态模式特征值集合  $M$  相匹配.与两个以上病态模式相匹配的检测器能检测共有特征空间,为了消除歧义性,取消这样的检测器;与各病态模式独有空间相匹配的检测器只能检测一种警度的病态,只对一种警度的病态具有敏感性,保留这样的检测器;取消与任何一种或一种以上的病态模式都不匹配的检测器.按此匹配情况形成成熟检测器集  $R' = (R'_1, R'_2, \dots, R'_n)$ ,其中  $R'_i = (i = 1, 2, \dots, n)$  为只与第  $i$  类病态模式独有空间相匹配,而其他任何故障模式独有空间不匹配的检测器子集.

步骤 2:通过小生镜策略找出重叠部分的检测器,在这部分检测器中依据检测器的匹配域值进行划分,对匹配域值低的检测器进行高频变异,对匹配阈值高的检测器进行低频变异.通过对重叠检测器的变异操作,减少了检测器彼此的重叠性同时提高了系统对已知入侵变异和未知入侵的检测能力,从而形成新的成熟检测器  $R'' = (R''_1, R''_2, \dots, R''_n)$ .

### 2.2 基于改进否定选择算法的预警流程

(1)检测器训练阶段:主要通过训练学习,产生适合上述预警系统的成熟检测器集合  $R'$ .

步骤 1:定义公路隧道群追尾交通事故预警系统自体空间集  $S$ ,并将已知的自体模式放入自体集  $S$  中.定义病态模式空间集  $M$ ,其中  $M = (M_1, M_2, M_3)$ ,代表 3 个不同警度的预警模式特征值集合: $M_1$  代表预警系统危险事故模式,警度为重警; $M_2$  代表预警系统应急事故模式,警度为中警; $M_3$  代表

预警系统一般事故模式,警度为轻警。

步骤2:随机产生候选检测器集合 $R$ ,初始化 $R=0$ .集合 $R$ 中每一个数据都不与自体空间集 $S$ 中的任何数据匹配,使检测器集合不能检测自体空间,只能捕获非自体空间的特征.数据匹配通过随机发生器生成一个长度为 $l$ 的二进制字符串,经过处理作为候选检测器。

步骤3:训练产生成熟检测器集 $R'$ .取消与两个以上病态模式相匹配能检测共有特征空间的检测器;保留与各病态模式独有空间相匹配只能检测一种警度的病态,只对一种警度的病态具有敏感性的检测器;取消与任何一种或一种以上的警度都不匹配的检测集数据,从而产生成熟的检测器集 $R'$ .再按匹配情况对 $R'$ 进行聚类,形成成熟检测器集合 $(R'_1, R'_2, R'_3)$ ,分别对应重警、中警、轻警,而不与其他警度匹配。

步骤4:判断 $R'$ 中的检测器数目是否达到给定值,若达到,则停止此训练阶段;否则,程序转到步骤2继续执行。

(2)检测器检测阶段:经过训练阶段的学习,获得了一定数目的新的成熟检测器集 $R'$ 后,进入检测器的检测阶段。

步骤1:定义记忆检测器集合 $R_j$ ,初始化 $R_j=0$ ;设置成熟检测器匹配域值 $\beta$ 和成熟检测器的生成时间 $t$ ;设置检测器的生命周期 $T$ 、成熟检测器的激活阈值 $r$ 和检测时间 $t_m$ 。

步骤2:抗原信息处理.经过预处理,将检测获得的特征参量原始数据处理为系统可以识别的二进制模式。

步骤3:将抗原信息与记忆检测器集 $R_j$ 进行匹配,若匹配,则产生报警然后转到步骤6;若不匹配,则转到步骤4进行处理。

步骤4:将抗原信息与成熟检测器集 $R'$ 进行匹配,若匹配,则产生报警然后转到步骤6;若不匹配,则转到步骤2进行处理。

步骤5:判断在生命周期内成熟检测器是否检测到异常,如果没有则将此检测器删除;判断成熟检测器匹配到的异常数目是否达到激活阈值,若达到激活阈值则将成熟检测器进化为记忆检测器。

步骤6:判断是否达到检测时间 $t_m$ ,若达到则训练结束,否则转到步骤2执行。

步骤7:判断产生的报警是否真实,若产生的报警真实则将报警信息发送到控制台由管理员处理,同时修改相应检测器的匹配阈值;否则程序转到步

骤2继续执行。

(3)检测器变异阶段:经过检测阶段的训练,可得成熟检测器和部分记忆检测器,由于匹配规则的限定,成熟检测器中存在大量重叠,降低了检测效率,检测器变异阶段主要目的就是对其进行变异处理。

步骤1:设置相似度参数 $\rho$ ,匹配阈值上限参数 $\sigma_{max}$ ,匹配阈值下限参数 $\sigma_{min}$ 。

步骤2:应用生物小生境原理,在新的成熟的检测器中选出重叠较为严重的一组检测器,依据参数 $\sigma_{max}$ 、 $\sigma_{min}$ 对这组成熟检测器进行进一步的筛选,产生两个检测器集合 $R_{max}$ 、 $R_{min}$ ,其中 $R_{max}$ 表示重叠严重但是匹配域值较高的检测器集合, $R_{min}$ 表示重叠严重并且匹配域值较低检测器集合。

步骤3:对集合 $R_{max}$ 进行低频变异,对集合 $R_{min}$ 进行高频变异。

步骤4:将变异后产生的检测器与自体检测器集 $S$ 进行否定选择处理,若通过否定选择处理的检测器放入新的成熟检测器集合 $R''(R''_1, R''_2, R''_3)$ 中,至此成熟检测器的变异过程结束。

以上是对产生新的成熟检测器整个过程的描述,然后训练好的新的成熟检测器 $R''(R''_1, R''_2, R''_3)$ 用于检测实际监测采集的特征参量数据集 $D(D_1, D_2, D_3)$ ,如果任意预警模式被激活,则认为发现异常,并根据激活的预警模式发出警报,并预报警度.改进的否定算法中集合 $M$ 、 $R''$ 、 $D$ 三者之间的匹配关系如图1所示. $R$ 为由集合 $S$ 随机产生的候选检测数据集合, $M$ 为已知或已定义的公路隧道群交通流系统病态模式空间, $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$ 分别代表预警系统不同警度的病态模式, $D$ 为公路隧道群追尾交通事故预警系统各特征参量的实测数据空间.候选检测器集 $R'$ 经过约简、聚类及变异优选,形成具有独特识别各种病态模式的检测器 $R''(R''_1, R''_2, R''_3)$ ,然后匹配实测数据,分别被 $(R''_1, R''_2, R''_3)$ 匹配的数据集合被定义为 $(D_1, D_2, D_3)$ , $D$ 中其他未被匹配到的数据即被认为是安全模式集合中的数据。

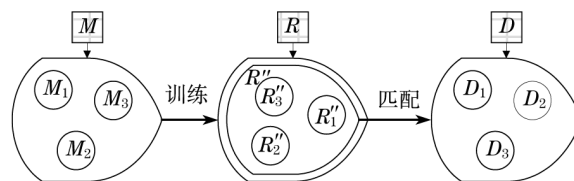


图1 改进否定算法中各集合之间的匹配关系  
Fig.1 Matching relations among the collections in the improved negative algorithm

### 3 工程实例仿真分析

#### 3.1 仿真参数设置

本文应用 Matlab 软件编写 M 语言,以西汉高速公路下行线秦岭一号隧道出口至涝峪口(K33 + 050~K64 + 859)为实例进行仿真分析,隧道群区段全长约 31.8 km,相关参数见表 2。

表 2 西汉高速公路隧道群道路交通参数  
Tab.2 Traffic parameters of Xihan highway tunnel group

参数编号	参数名称	参数值
1	隧道个数/个	23
2	隧道过渡段最小间距/m	15
3	隧道过渡段平均间距/m	52
4	最小曲线半径/m	450
5	设计行车速度/( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	80
6	平均纵向坡度 $i$ /%	2.86
7	平均附着系数(沥青路面) $\mu$	0.625(晴天);0.525(雨天);0.275(雪天)
8	超高横坡 $i_h$ /%	3
9	日小时交通量/( $\text{pcu} \cdot \text{d}^{-1}$ )	15 800
10	大车率/%	42

隧道洞内外亮度差值  $\Delta l$ ,根据西汉高速公路隧道照明设计,对隧道实施分级调光控制,不同天气下洞内外亮度理论计算值不同,具体数值见表 3。

表 3 西汉高速公路隧道群不同天气下洞内外亮度值  
Tab.3 Brightness value outside the Xihan highway tunnel under different weather conditions

	晴天	多云	阴天	重阴
洞口光亮度 $L_0$ /( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )	4 000	2 250	1 125	585
引入段光亮度 $L_{th}$ /( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )	108	60.75	30.38	15.80

预警参数数据采集与数据标准化处理时,采用制动距离  $S$ 、行驶速度  $V$ 、异常车辆长度  $l$ ,前两者为主要预警参数,后者为辅助预警参数(原始标准数据略)。根据二进制编码方式对原始标准数据进行编码,首先按均匀分布产生各级警度集合空间的候选检测数据,检测数据量  $n$  的适当取值可以使得产生的候选检测数据覆盖整个预警空间,经反复试验取值为 200,由此产生候选检测数据集  $R$ ;然后依据本文采用的约简和聚类的方法,生成成熟检测器集  $R'$ ;其次设定成熟检测器激活阈值  $r = 0.000 2$  和设置检测器的生命周期  $T = 24 \text{ h}$ 、检测时间  $t_m$  为两年,对成熟检测器进行检测,判断产生的报警是否真实,若产生的报警真实则将报警信息发送到控制台由管

理员处理,同时修改相应检测器的匹配阈值;最后应用小生境原理,经过反复试验设定变异次数为 8,进化代数为 10 对成熟检测器进行变异处理,生成检测率较高的新的成熟检测器集合  $R''$ 。

#### 3.2 仿真结果分析

仿真主要实现晴天、雨天、雪天 3 种不同天气情况下的追尾交通事故预警,输出仿真结果为事故发生的最小安全距离和车辆行驶速度绝对差值,并对输出的结果作验证和比较分析。

##### 3.2.1 晴天工况下仿真结果分析

本文中速度绝对差值与最小安全距离作为预警事故特性表征指标,限速 80 和 60  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  条件下,预警事故特性输出结果分别如图 2 和图 3 所示,预警参数及预警事故分布见表 4。

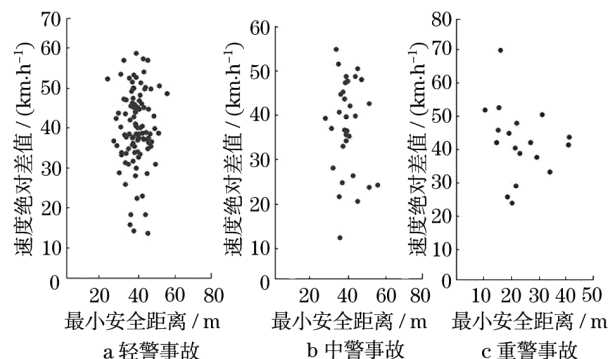


图 2 晴天工况下预警仿真输出结果(限速 80  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )  
Fig.2 Simulation output results (speed limited to 80  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )

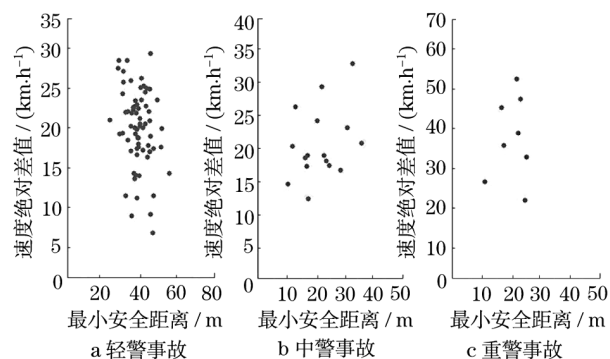


图 3 晴天工况下预警仿真输出结果(限速 60  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )  
Fig.3 Simulation output results (speed limited to 60  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )

由表 4 的仿真结果分析可知:①随着限速值降低(从限速 80  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  降低至 60  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ),总体事故次数随之降低;②限速 80  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  时预警检测事故 148 起,限速 60  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  时预警检测事故 92 起,事故率降低了 37.8%;③限速 80  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  时,轻警事故的平均绝对速度差值为 38.2  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、平均最

小安全距离为 43.5 m, 中警事故的平均绝对速度差值为 41.2 km · h<sup>-1</sup>、平均最小安全距离为 38.5 m, 重警事故的平均绝对速度差值为 49.6 km · h<sup>-1</sup>、平均最小安全距离为 25.5 m; ④限速 60 km · h<sup>-1</sup> 时, 轻警事故的平均绝对速度差值为 22.8 km · h<sup>-1</sup>、平均最小安全距离为 41.2 m, 中警事故的平均绝对速

度差值为 23.6 km · h<sup>-1</sup>、平均最小安全距离为 26.8 m, 重警事故的平均绝对速度差值为 39.2 km · h<sup>-1</sup>、平均最小安全距离为 18.4 m; ⑤限速 80 km · h<sup>-1</sup> 条件下, 事故平均检测率为 96.6%, 误警率为 4.7%, 限速 60 km · h<sup>-1</sup> 条件下, 事故平均检测率为 95.8%, 误警率为 4.8%.

表 4 预警参数及预警事故分布结果(晴天工况下)

Tab.4 Results of early-warning parameters and accident distributions (sunny conditions)

预警事故类型	事故次数	检测率/%	误警率/%	平均最小安全距离/m	平均行驶速度/(km · h <sup>-1</sup> )	平均速度绝对差值/(km · h <sup>-1</sup> )
重警事故	18	98.2	97.6	1.8	2.1	25.5
中警事故	32	96.2	95.8	5.3	4.2	38.5
轻警事故	98	95.4	94.0	7.2	8.0	43.5
限速/(km · h <sup>-1</sup> )	80	60	80	60	80	60

### 3.2.2 雨天工况下仿真结果分析

以速度绝对差值与最小安全距离作为预警事故特性表征指标, 限速 60 和 40 km · h<sup>-1</sup> 条件下, 雨天预警事故特性输出结果分别如图 4 和图 5 所示, 预警参数及预警事故分布见表 5.

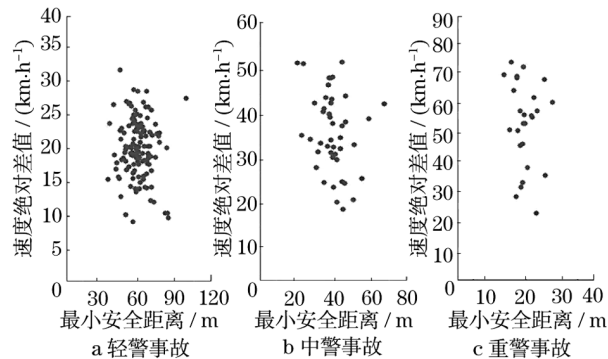


图 4 雨天工况下预警仿真输出结果(限速 60 km · h<sup>-1</sup>)

Fig.4 Simulation output results (speed limited to 60 km · h<sup>-1</sup>)

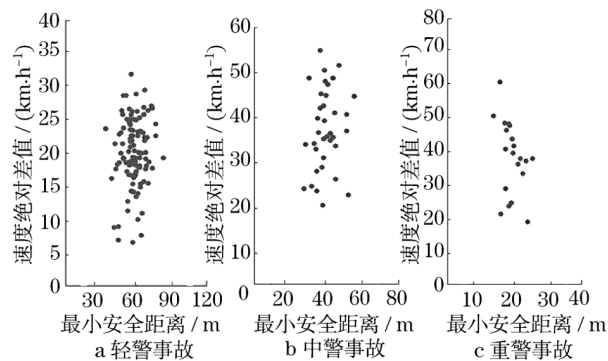


图 5 雨天工况下预警仿真输出结果(限速 40 km · h<sup>-1</sup>)

Fig.5 Simulation output results (speed limited to 40 km · h<sup>-1</sup>)

由仿真结果分析可知: ①随着限速值降低(从限

速 60 km · h<sup>-1</sup> 降低至 40 km · h<sup>-1</sup>), 总体事故次数随之降低; ②限速 60 km · h<sup>-1</sup> 时预警检测事故 198 起, 限速 40 km · h<sup>-1</sup> 时预警检测事故 162 起, 事故率降低了 18.2%; ③限速 60 km · h<sup>-1</sup> 时, 轻警事故的平均绝对速度差值为 21.2 km · h<sup>-1</sup>、平均最小安全距离为 62.5 m, 中警事故的平均绝对速度差值为 36.2 km · h<sup>-1</sup>、平均最小安全距离为 42.6 m, 重警事故的平均绝对速度差值为 50.2 km · h<sup>-1</sup>、平均最小安全距离为 21.0 m; ④限速 40 km · h<sup>-1</sup> 时, 轻警事故的平均绝对速度差值为 20.8 km · h<sup>-1</sup>、平均最小安全距离为 59.2 m, 中警事故的平均绝对速度差值为 35.6 km · h<sup>-1</sup>、平均最小安全距离为 40.8 m, 重警事故的平均绝对速度差值为 40.5 km · h<sup>-1</sup>、平均最小安全距离为 22.4 m; ⑤限速 60 km · h<sup>-1</sup> 条件下, 事故平均检测率为 96.0%, 误警率为 2.3%, 限速 40 km · h<sup>-1</sup> 条件下, 事故平均检测率为 96.0%, 误警率为 3.3%.

### 3.2.3 雪天工况下仿真结果分析

以速度绝对差值与最小安全距离作为预警事故特性表征指标, 限速 60 和 40 km · h<sup>-1</sup> 条件下, 雪天预警事故特性输出结果分别如图 6 和图 7 所示, 预警参数及预警事故分布见表 6.

由仿真结果分析可知: ①随着限速值降低(从限速 60 km · h<sup>-1</sup> 降低至 40 km · h<sup>-1</sup>), 总体事故次数随之降低; ②限速 80 km · h<sup>-1</sup> 时预警检测事故 196 起, 限速 60 km · h<sup>-1</sup> 时预警检测事故 170 起, 事故率降低了 13.3%; ③限速 60 km · h<sup>-1</sup> 时, 轻警事故的平均绝对速度差值为 22.6 km · h<sup>-1</sup>、平均最小安全距离为 54.4 m, 中警事故的平均绝对速度差值为 32.5 km · h<sup>-1</sup>、平均最小安全距离为 40.5 m, 重警

事故的平均绝对速度差值为  $44.1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、平均最小安全距离为  $21.4 \text{ m}$ ；④限速  $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时，轻警事故的平均绝对速度差值为  $19.8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、平均最小安全距离为  $55.2 \text{ m}$ ，中警事故的平均绝对速度差值为  $29.8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、平均最小安全距离为  $38.6 \text{ m}$ ，

重警事故的平均绝对速度差值为  $40.2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、平均最小安全距离为  $20.4 \text{ m}$ ；⑤限速  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  条件下，事故平均检测率为  $96.7\%$ ，误警率为  $4.7\%$ ，限速  $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  条件下，事故平均检测率为  $96.6\%$ ，误警率为  $4.7\%$ 。

表 5 预警参数及预警事故分布结果(雨天工况下)

Tab.5 Results of early-warning parameters and accident distributions (rainy conditions)

预警事故类型	事故次数		检测率/%		误警率/%		平均最小安全距离/m		平均行驶速度/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )		平均速度绝对差值/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	
重警事故	26	20	97.8	98.2	1.2	1.6	21.0	22.4	62.4	44.0	50.2	40.5
中警事故	44	36	95.5	94.6	2.4	3.2	42.6	40.8	55.6	42.4	36.2	35.6
轻警事故	128	106	94.8	95.2	3.2	5.0	62.5	59.2	44.5	40.5	21.2	20.8
限速/( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	60	40	60	40	60	40	60	40	60	40	60	40

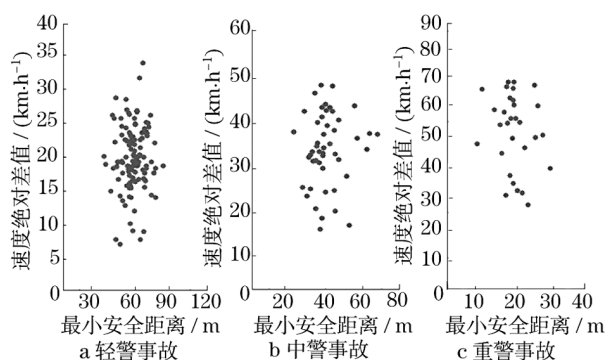
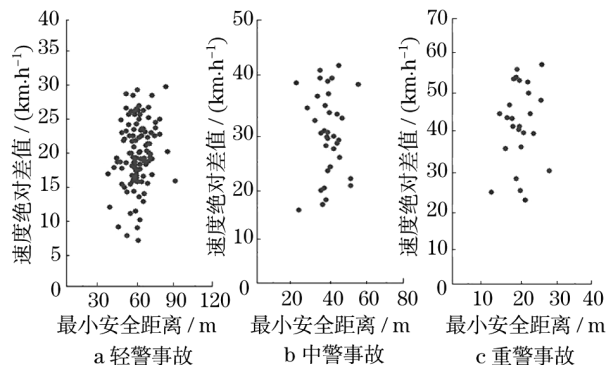
图 6 雪天工况下预警仿真输出结果(限速  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ )Fig.6 Simulation output results (speed limited to  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ )图 7 雪天工况下预警仿真输出结果(限速  $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ )Fig.7 Simulation output results (speed limited to  $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ )

表 6 预警参数及预警事故分布结果(雪天工况下)

Tab.6 Results of early-warning parameters and accident distributions (snow conditions)

预警事故类型	事故次数		检测率/%		误警率/%		平均最小安全距离/m		平均行驶速度/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )		平均速度绝对差值/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	
重警事故	30	25	98.6	97.0	1.8	2.1	21.4	20.4	58.4	43.4	44.1	40.2
中警事故	48	35	97.5	96.2	5.3	4.2	40.5	38.6	50.4	40.6	32.5	29.8
轻警事故	118	110	94.2	96.5	7.2	8.0	54.4	55.2	42.0	36.5	22.6	19.8
限速/( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	60	40	60	40	60	40	60	40	60	40	60	40

### 3.2.4 仿真结果总结分析

由以上 3 种工况下仿真结果分析可知：①西汉高速公路隧道群段，随着天气条件的改变，车辆行驶环境将不断变化，从晴天到雨天和雪天的交通事故逐步增加，因此应根据天气条件制定不同的限速标准，并用电子情报板实时提示，减少交通事故发生；②雨天和雪天工况下，交通事故增多，一方面是由于车辆行驶速度过快造成最小安全距离不够，致使追尾事故外，另一方面是由于路面附着力下降的缘故，因此需要采取有效措施，增加隧道群段路面的抗滑系数；③为了让公路隧道群追尾交通事故预警理论

服务于西汉高速公路运营管理部门，有必要在事故多发段有效鉴别的基础上，进行相关预警设施布置，并将预警系统与西汉高速公路监控中心相接。

## 4 小结

交通事故在公路隧道群运营期间的发生具有偶然性和不可确定性，同时又是必然的，管理者只能通过一定的预防管理措施尽量降低事故的发生概率，完全杜绝事故的发生是不可能的。隧道交通事故形态多样，限于预警特征参量的可测性和可量化性要

求,本文主要研究的对象是车辆与车辆之间的同车道、换车道工况下的追尾交通事故,通过建立起基于改进否定算法的公路隧道群追尾交通事故识别预警模型,对事故发展趋势进行识别、判断并警报,指导管理者采取相应的预防措施,为保障公路隧道群长期、持续地处于有秩序的安全状态提供理论支撑。至于其他形态事故本文中未作细致深入研究和探讨,但是随着物联网技术、射频识别(RFID)技术的日趋成熟和推广,实时监测车辆在隧道群行驶过程中数字化信息技术成为可能,将可以获取越来越多的事故形态预警特征参量信息,不断丰富和完善公路隧道群交通事故预警系统理论体系。

#### 参考文献:

- [1] Koppelman F S, Lin W. Development of an expressway incident detection algorithm for the advance area based on the California algorithm set[R]. Evanston: the Transportation Center, 1997. 256 - 260.
- [2] Martin P T, Perrin J, Hansen B. Incident detection algorithm evaluation[M]. [S. 1]: University of Utah, 2001.
- [3] ZHOU Sam Dingshan. An integrated traffic incident detection model[M]. Austin: University of Texas, 2000.
- [4] Srinivasan D, Cheu R L, Poh Y P, et al. Development of an intelligent technique for traffic network incident detection[J]. Engineering Application of Artificial Intelligence, 2000 (13): 311.
- [5] 林可鸿. 人工免疫系统及其化工中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学材料与化学工程学院, 2008.
- LIN Kehong. Research on artificial immune system and applications in chemical engineering[D]. Hangzhou: Zhejiang University. College of Materials Science and Chemical Engineering, 2008.
- [6] Farmer J D, Packard N H, Perelson A S. The immune system, adaptation, and machine learning[J]. Physica, 1986(22D): 187.
- [7] Esponda F, Forrest S, Helman P. A formal framework for positive and negative detection schemes[J]. IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics-Part B: Cybernetics, 2004, 34 (1): 357.
- [8] 肖毅, 胡伟雄, 肖明, 等. 基于免疫的入侵检测系统研究[J]. 计算机工程, 2006, 32(20): 188.
- XIAO Yi, HU Weixiong, XIAO Ming, et al. Study on intrusion detection system based on immune agent [J]. Computer Engineering, 2006, 32(20): 188.

#### (上接第 1574 页)

(4) 带风嘴箱形主梁断面的颤振性能一般是随着风攻角的增加而降低,因此,可以通过风洞试验找到一个最优的 CHSP 宽度,从而最大限度地改善其不同风攻角下的总体颤振性能。

#### 参考文献:

- [1] 项海帆, 陈艾荣. 特大跨度桥梁抗风研究的新进展[J]. 土木工程学报, 2003, 36(4): 1.
- XIANG Haifan, CHEN Airong. Recent advances in research on aerodynamics of extra long-span bridges [J]. Journal of Civil Engineering, 2003, 36(4): 1.
- [2] 杨咏昕. 大跨度桥梁二维颤振机理及其应用研究[D]. 上海: 同济大学桥梁工程系, 2002.
- YANG Yongxin. Two-dimensional flutter mechanism and its application for long-span bridges [D]. Shanghai: Tongji University. Department of Bridge Engineering, 2002.
- [3] YANG Yongxin, GE Yaojun, XIANG Haifan. Coupling effects of degrees of freedom in flutter instability of long-span bridges[C] // Proceedings of the 2nd International Symposium on Advances in Wind & Structures. Busan: [s. n.], 2002: 625 - 632.
- [4] YANG Yongxin, GE Yaojun, XIANG Haifan. 3DOF coupling flutter analysis for long-span bridges [C] // Proceeding of the 11th International Conference on Wind Engineering. Lubbock: [s. n.], 2003: 925 - 932.
- [5] 杨咏昕, 葛耀君, 项海帆. 大跨度桥梁典型断面颤振机理[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34(4): 455.
- YANG Yongxin, GE Yaojun, XIANG Haifan. Flutter mechanism of representative sections for long-span bridge [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(4): 455.
- [6] 陈艾荣. 苏通大桥主桥节段模型风洞试验研究[R]. 上海: 同济大学桥梁工程系, 2004.
- CHEN Airong. Research of wind tunnel sectional model test on sutong bridge [R]. Shanghai: Tongji University. Department of Bridge Engineering, 2004.
- [7] 杨咏昕, 葛耀君, 项海帆. 大跨度桥梁中央开槽颤振控制效果和机理研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 39(7): 74.
- YANG Yongxin, GE Yaojun, XIANG Haifan. Flutter controlling effect and mechanism of central-slotting for long-span bridges [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 39 (7): 74.