

# 基于驾驶员制动操作行为的车辆追尾预警算法<sup>\*</sup>

林庆峰<sup>1</sup>, 成 波<sup>2</sup>, 屈肖蕾<sup>2</sup>, 张 波<sup>2</sup>, 徐少兵<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学交通科学与工程学院 北京 100191; 2. 清华大学 汽车安全与节能国家重点实验室 北京 100084)

**[摘要]** 利用图像式汽车行驶记录仪在北京市采集了大量自然行驶状态下的驾驶行为数据, 基于追尾碰撞中的驾驶员制动操作行为, 分析驾驶员安全与危险跟车状态和车辆状态参数之间的关系, 利用 Fisher 判别分析法建立了符合驾驶员危险感知特性的车辆追尾预警算法。研究结果表明该算法总的判别准确率高达 95%。

**关键词:** 驾驶员行为; 追尾预警; 危险认知; Fisher 判别分析; 图像式汽车行驶记录仪

## Vehicle Rear-end Collision Warning Algorithm Based on Driver's Braking Behavior

Lin Qingfeng<sup>1</sup>, Cheng Bo<sup>2</sup>, Qu Xiaolei<sup>2</sup>, Zhang Bo<sup>2</sup> & Xu Shaobing<sup>2</sup>

1. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191;

2. Tsinghua University, State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Beijing 100084

**[Abstract]** A large number of naturalistic driving data are collected in Beijing by using video drive recorder. Based on driver's braking behavior in rear-end collision, the relationships between safe/dangerous vehicle following states and vehicle state parameters are analyzed, and a rear-end collision warning algorithm in accordance with the characteristics of driver's risk perception is established by Fisher discriminant analysis. The results of study show that the discrimination accuracy of the algorithm reaches as high as 95%.

**Keywords:** driver behavior; rear-end collision warning; risk perception; Fisher discriminant analysis; video drive recorder

## 前言

车辆行驶安全状态的判断是追尾预警系统设计的关键。当前的车辆追尾预警算法主要有安全距离和碰撞时间算法两类。安全距离算法根据两车相对运动的过程, 确定安全停车所需的安全距离阈值, 当实际车间距离小于安全距离阈值时追尾预警系统触发<sup>[1]</sup>; 碰撞时间(time to collision, TTC)算法是通过比较计算得到的两车间的 TTC 与 TTC 安全阈值来确定安全状态<sup>[2]</sup>。安全距离算法存在的问题主要是准确性较低, 在复杂交通条件下的适应性较差, 某些关键参数难以采集(如前车减速度)和较少考虑驾驶员主观感受等。国际上很多汽车生产厂商在前碰撞预防系统(FCWS)或预碰撞系统(PCS)等驾驶安

全辅助系统设计中采用 TTC 算法作为预警算法, 但算法的有效性和适应性仍有待进一步提高。现有的车辆追尾预警算法研究多数是通过驾驶模拟器和场地实验采集驾驶行为数据, 缺乏对自然驾驶状态下驾驶行为数据的采集。

图像式汽车行驶记录仪(video drive recorder, VDR)是一种新型的汽车行驶记录仪, 可以实时记录紧急情况发生前后一段时间内的车辆状态参数和车辆周围的图像信息, 能够为事故分析和车辆安全技术等研究提供可靠的科学依据, 因而在国际汽车安全研究领域得到了广泛的关注。近年来, 美国和日本相继开展了基于图像式汽车行驶记录仪的驾驶行为研究, 取得了一系列阶段性成果<sup>[3-5]</sup>。在我国, 清华大学汽车系选择 50 辆安装有 VDR 的出租车作为实验车辆, 在北京市开展了紧急情况下的驾驶行为

<sup>\*</sup> 清华大学与丰田公司国际合作项目(20113000111)和中央高校基本科研业务费专项资金(YWF-10-02-060)资助。

原稿收到日期为 2011 年 3 月 4 日, 修改稿收到日期为 2011 年 5 月 29 日。

研究<sup>[6-10]</sup>。

本研究的目的是设计符合城市交通环境下驾驶员危险感知特性的车辆追尾预警算法。利用收集的追尾数据,提出驾驶员跟车状态的分类方法,建立基于驾驶员制动操作特性的车辆追尾预警算法,满足城市交通环境下车辆行驶的安全性和舒适性要求。

## 1 实验设计

### 1.1 实验流程

选择北京市某出租汽车公司的 50 辆出租车作为实验车辆(自车),出租车驾驶员作为被试者。实验地点选择北京市出租车日常的行驶区域。实验期为 1 年。每辆出租车日均行驶里程约 250km。

### 1.2 实验装置

实验的数据采集装置为 VDR。它安装在出租车前风窗玻璃内侧中央后视镜附近,可记录紧急情况发生前后一段时间内(触发前 12s、触发后 6s,时间可调)的自车速度、加速度、制动操作、转向操作、GPS 和车辆前方的图像等信息。VDR 触发设定的原则为紧急情况发生时能够正确记录所需的数据,而在非紧急情况发生时能够避免因外界的干扰(如路面凹凸引起的振动等)而发生误记录。通过预备实验,最终确定 VDR 的触发条件为 0.5s 内车辆纵向平均减速度大于  $0.4g$ ,或者瞬时减速度大于  $2g$ 。VDR 记录数据后将数据输入到存储卡中,实验中定期进行数据的回收和分析处理。图 1 为 VDR 记录的一起追尾案例的图像信息,图中:(a)为城市交通环境下的正常跟车状态;(b)为前车突然制动时刻(前车制动灯亮起时刻);(c)为自车制动时刻;(d)为两车距离最近时刻。

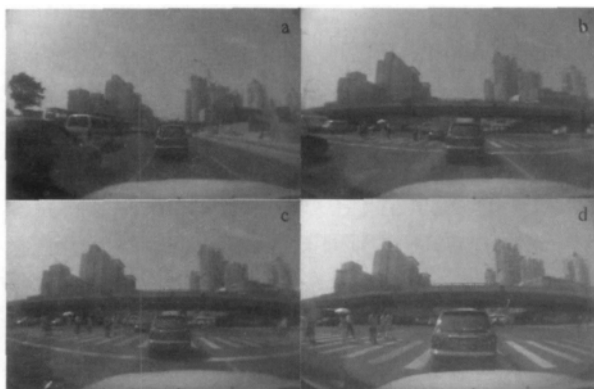


图 1 VDR 记录的图像信息

### 1.3 车间距离测量方法

为了获取跟车过程中车间距离和前车速度等信息,文中基于小孔成像原理的测距方法,利用 VDR 记录的车辆前方图像中的前车宽度(用像素表示)与车间距离的关系式预测车间距离,然后通过计算距离差分的方法得到相对速度,结合 VDR 记录的自车速度进一步计算出前车速度。计算车间距离  $< 30\text{m}$  测量的平均误差约为 4%,最大误差小于 10%。

## 2 驾驶员跟车状态分类方法

驾驶员在跟车过程中通常会尽量紧跟前车行驶,如果车间距离过近或过远,驾驶员会通过加减速操作进行车间距离的调整,最终形成稳定的跟车状态。直至跟车过程中前车紧急制动时刻(制动灯亮起)前的瞬间自车处于匀速跟随状态(稳态跟车),则该状态被视为驾驶员安全跟车状态,在该状态下驾驶员无需采取制动措施。一旦前车紧急制动,车间距离迅速缩短,车辆间的危险程度迅速增大,驾驶员此时通过车间距离、相对速度和自车速度等参数综合评估车辆间的危险程度,如果车辆间的危险程度超过了驾驶员的危险感知阈值,驾驶员就会立即采取紧急制动操作以避免碰撞的发生。因此,跟车过程中自车制动时刻的车辆状态被视为驾驶员危险跟车状态,该状态下驾驶员须采取制动操作。

从追尾数据中提取前车制动时刻(安全跟车状态)和自车制动时刻(危险跟车状态)的自车速度  $v$ 、车间距离  $d$  和相对速度  $v_R$  等车辆状态参数,建立其判别函数和判别准则,然后对新的实时跟车数据进行分类,建立反映驾驶员制动操作和跟车状态判断关系的车辆追尾预警算法。算法设计流程见图 2。

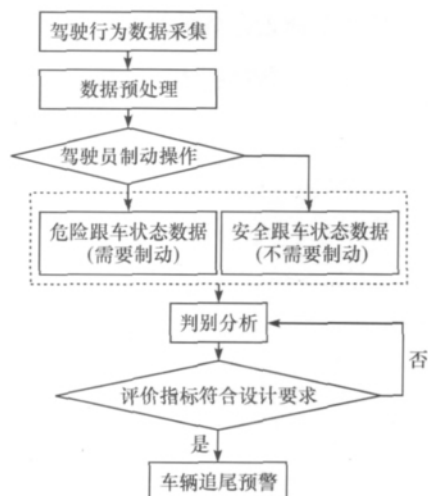


图 2 算法设计流程框图

### 3 数据分析

通过对原始数据进行预处理,筛选出前车制动时刻相对速度(自车速度减去前车速度得到的差值)处于  $-1 \sim 1 \text{ km/h}$  的数据,同时剔除由于实验过程中部分 VDR 移动位置、视线不良等因素造成测量误差较大的数据,最终得到 141 组紧急情况下的跟车数据。前车制动时刻车距和自车速度分布见图 3。

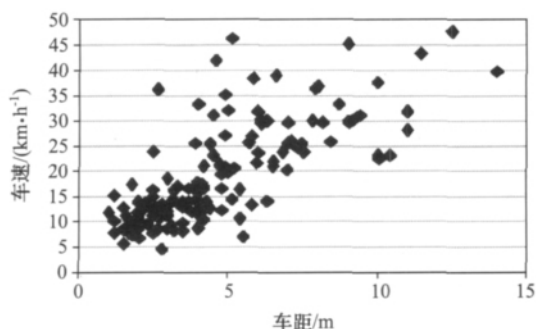


图 3 前车制动时刻车距和自车速度分布

提取前车制动和自车制动时刻的  $d$ 、 $v$ 、 $v_R$ 、 $THW$  (车间时距) 和  $TTC$  进行统计分析。其中,  $THW$  和  $TTC$  常用来评估车辆间的危险状态。其计算公式为:  $THW = d/v$ , 单位为  $s$ ;  $TTC = d/v_R$ , 单位为  $s$ 。为避免相对速度等于 0 时出现  $TTC$  趋近于无穷大的问题,通常用其倒数  $1/TTC$  (单位为  $s^{-1}$ ) 来代替  $TTC$ 。各参数的统计结果见表 1。从图 3 和表 1 可以看出,稳态跟车状态下前车制动时刻自车速度均值为  $19.16 \text{ km/h}$ , 标准差为  $9.94 \text{ km/h}$ , 车间距离均值为  $4.7 \text{ m}$ , 标准差为  $2.65 \text{ m}$ 。这表明城市稳态跟车环境下车辆多数处于低速近距离的跟车状态。

表 1 参数的统计结果

参数	跟车状态	均值	标准差
$d/\text{m}$	安全	4.7	2.65
	危险	3.75	2.14
$v/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	安全	19.16	9.94
	危险	19.98	9.87
$v_R/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	安全	0.05	0.35
	危险	5.6	3.25
$THW/\text{s}$	安全	0.93	0.38
	危险	0.69	0.22
$(1/TTC)/\text{s}^{-1}$	安全	0	0.04
	危险	0.46	0.23

### 4 追尾预警算法的建立及验证

#### 4.1 算法的建立

本文中采用 Fisher 判别准则建立车辆追尾预警算法。选择  $d$ 、 $v$ 、 $v_R$ 、 $THW$  和  $1/TTC$  参数作为判别函数默认引入的自变量,预测的安全和危险两类跟车状态作为判别函数的输出变量。运用 SPSS 统计软件建立基于逐步判别法的判别函数,141 组追尾数据全部作为训练样本。逐步判别法采用 Wilks'  $\lambda$  法,即每步都选择总体 Wilks'  $\lambda$  统计量达到最小的变量进入判别函数。SPSS 中设定默认引入变量的  $F$  值为 3.84,剔除变量的  $F$  值为 2.71。选择未标准化的 Fisher 判别函数(典型判别函数)的系数选项。分析逐步判别的变量筛选过程可知,判别分析结果经过 3 步,最终有 3 个变量进入方程。第 1 步加入了  $1/TTC$ ; 第 2 步加入了  $v_R$ ; 第 3 步加入了  $THW$ , 这 3 步的 Wilks'  $\lambda$  检验都很显著,说明每一步加入的变量对正确判断分类都有显著作用。变量分析结果见表 2。

表 2 进入方程的变量分析

步骤	进入方程的变量	容忍值	变动后的 $F$ 值	Wilks's $\lambda$
1	$1/TTC$	1	558.74	
2	$1/TTC$	0.89	130.7	0.41
	$v_R$	0.89	57.1	0.33
3	$1/TTC$	0.87	97.28	0.35
	$v_R$	0.85	66.85	0.33
	$THW$	0.95	16.4	0.28

计算得到未标准化的典型判别函数系数:  $v_R$  为 0.24,  $1/TTC$  为 3.88,  $THW$  为  $-0.92$ , 常数项为  $-0.84$ 。判别方程为

$$f = -0.84 - 0.92THW + 3.88/TTC + 0.24v_R \quad (1)$$

本文中的跟车状态为二类判别(安全和危险跟车状态),二类判别以 0 为分界点,将待判别的某跟车状态下的  $v_R$ 、 $THW$  和  $1/TTC$  代入判别方程,如果计算求得的判别函数值  $f > 0$ ,则该状态为危险跟车状态,此时车辆追尾预警系统就会发出警告信息提示驾驶员采取制动措施;如果计算求得的判别函数值  $f < 0$ ,则该状态为安全跟车状态,此时车辆追尾预警系统不发出警告信息。

#### 4.2 算法的验证

计算得到判别函数的特征值为 2.82, 方差百分比为 100%, 表明判别函数可以解释 100% 的方差,

该判别函数有较强的判别能力。以误警率、漏警率和总的判别准确率作为判别函数的性能评价指标。若令样本的组数为  $N$ , 则误警率 = 安全跟车状态数据被判别为危险的数据 /  $N$ ; 漏警率 = 危险跟车状态数据被判别为安全的数据 /  $N$ ; 总的判别准确率 = (安全跟车状态数据被判别为危险的数据 + 危险跟车状态数据被判别为安全的数据) /  $2N$ 。利用交叉验证法计算判别函数的性能评价指标, 以此来验证其有效性。结果见表 3。

表 3 算法判别分类结果

判别结果		预测值		合计
		安全	危险	
实际值	安全	141	0	141
	危险	13	128	141

从表 3 可以看出, 安全跟车状态的数据中没有被判别为危险的数据, 因此, 算法的误警率为 0; 同样, 危险跟车状态数据被判别为安全的数据为 13 个, 因此, 算法的漏警率为 9.2%, 算法总的判别准确率 =  $(141 + 128) / 282 = 95.4\%$ 。

## 5 结论

(1) 利用图像式汽车行驶记录仪收集了大量紧急情况下的驾驶行为数据, 对驾驶员跟车行为数据进行统计, 结果表明城市跟车环境下驾驶员多数处于低速近距离的跟车状态。

(2) 提出了驾驶员跟车过程中判断安全和危险跟车状态的分类方法, 即稳态跟车过程中前车制动时刻的车辆状态代表驾驶员安全跟车状态, 一旦前车紧急制动, 自车制动时刻的车辆状态代表驾驶员危险跟车状态。

(3) 建立了基于 Fisher 判别准则的车辆追尾预警算法, 算法的误警率为 0, 漏警率为 9.2%, 总的判

别准确率为 95.4%。因此, 算法具有较高的判别准确率, 能够满足城市低速近距离稳态跟车时车辆行驶的舒适性和安全性要求。

## 参考文献

- [1] Burgett A L, Carter A, Miller R J, et al. A Collision Warning Algorithm for Rear-end Collisions [R]. Tech Report 98-S2-P-31. Washington, DC: NHTSA, 1998.
- [2] Hirst S, Graham R. The Format and Perception of Collision Warnings[M]//Noy Y I. Ergonomics and Safety of Intelligent Driver Interfaces. Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates Inc, 1997: 203 - 219.
- [3] Nishimoto T, Yoshimoto K, Nishida H, et al. Development and Validation of a Drive-recorder for Automobile Accidents[C]. Proceedings of JSAE 2000 Congress, Japan: JSAE 2000: 9 - 12.
- [4] Kitajima S, Kubo N, Arai T, et al. Analysis of Mechanism of Rear-end Collision Accident by Drive Data Recorders[C]. Proceedings of JSAE 2006 Congress, Japan: JSAE 2006: 1 - 6.
- [5] Dingus T A, Klauer S G, Neale V L, et al. The 100-Car Naturalistic Driving Study, Phase II-Results of the 100-Car Field Experiment [R]. Tech Report DOT HS 810 593. Washington, DC: NHTSA, 2006.
- [6] Lin Q F, Cheng B, Lai J K, et al. A New Method for Analysis of Traffic Conflict by Using Video Drive Recorders[C]. Proceedings of the 14th World Congress on Intelligent Transport Systems, Beijing, China: ITS America, 2007.
- [7] Lin Q F, Feng R J, Cheng B, et al. Analysis of Causes of Rear-end Conflicts Using Naturalistic Driving Data Collected by Video Drive Recorders[C]. Proceedings of SAE 2008 World Congress, Detroit, Michigan, USA, 2008.
- [8] Cheng B, Lin Q F, Li G F, et al. Evaluation Method for Driver Risk Perception Models in Car-Following Situations[C]. Proceedings of JSAE 2011 Congress, Yokohama, Japan: JSAE, 2011.
- [9] Cheng B, Lin Q F, Song T J, et al. Analysis of Driver Brake Operation in Near-crash Situation Using Naturalistic Driving Data[J]. International Journal of Automotive Engineering, 2011, 2(4): 87 - 94.
- [10] 林庆峰, 成波. 基于 Logistic 回归的驾驶人跟车危险认知模型[J]. 中国公路学报, 2011, 24(6): 103 - 108.