

紧急制动工况下驾驶人驾驶特性分析

刘宇, 韩旭晖, 何圭波, 曲大义, 宋年秀*

(青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 青岛 266525)

摘要: 为了研究不同驾驶特性驾驶人在制动操纵行为上的差异, 借助驾驶模拟器搭建驾驶人数据采集平台, 采集紧急制动工况下的驾驶数据, 利用模糊 C 均值算法聚类分析, 得到保守型、一般型和激进型 3 种驾驶特性, 并进行制动行为风格分析。结果表明: 不同驾驶特性的驾驶人在紧急制动工况下的操纵行为存在很大差异, 对制动距离、制动时间、停车间距、碰撞时间等方面均产生影响。紧急制动工况下, 相较于一般型驾驶人, 保守型驾驶人制动时机更早, 制动减速度更大, 制动持续时间更短, 驾驶人的制动行为较一致; 激进型驾驶人制动时机较晚, 制动减速度较小, 制动持续时间较长, 驾驶人的驾驶行为任意性较大。

关键词: 驾驶特性; 聚类分析; 驾驶模拟器

中图分类号: U461.91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2024)05-0113-07

Analysis of drivers' driving characteristics under emergency braking conditions

LIU Yu, HAN Xuhui, HE Guibo, QU Dayi, SONG Nianxiu*

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: In order to study the differences in brake control behavior of drivers with different driving characteristics, a driver data collection platform is built with the help of a driving simulator to collect the driving data under emergency braking conditions, and the fuzzy C-means algorithm is used for clustering analysis to obtain the conservative, general and radical driving characteristics, and to analyze the braking behavior style. The results show that the handling behaviors of drivers with different driving characteristics under emergency braking conditions are very different, which has an impact on braking distance, braking time, stopping distance, time to collision, etc. Under emergency braking conditions, compared with general drivers, conservative drivers exhibit earlier braking initiation, greater deceleration, shorter duration of braking, and more consistent braking behaviors. Conversely, radical drivers demonstrate delayed braking initiation, lower deceleration, prolonged duration of braking, and more erratic driving behaviors.

Key words: driving characteristics; cluster analysis; driving simulator

收稿日期: 2023-02-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52272311)

作者简介: 刘宇(1997—), 男, 山东枣庄人。硕士, 研究方向为交通运输。E-mail: 2040353971@qq.com。

* 通信作者: 宋年秀(1963—), 男, 山东青岛人。博士, 教授, 主要从事汽车性能检测、汽车可靠性评价等方面的研究。
E-mail: songnianxiu@163.com。

研究发现,驾驶特性和追尾事故存在着密切联系^[1-5],很多学者也已经考虑到驾驶特性对追尾预警的影响。聂蕊蕊等^[6]进行了考虑驾驶风格的高速路雾天限速研究,为不同风格驾驶人提供限速值参考。胡均平等^[7]提出了可以根据驾驶人行为变化和个体差异调整防碰撞预警系统阈值的算法,这种算法能够在长期驾驶的条件下在线自适应驾驶员行为。陈计伟等^[8]提出了一种基于多层感知器神经网络的行车安全预警算法,相对于传统预警算法提高了预警的有效性和准确性。秦雅琴等^[9]综合利用统计学、Pearson 相关性分析法及多种拟合方法研究驾驶适宜性的关系,发现不同风格驾驶人对于风险感知存在较大差异。LUO 等^[10]建立了可以适应不同类型驾驶员的安全距离模型,以驾驶员年龄、驾龄、疲劳程度为模型输入,输出驾驶员反应时间,优化了传统的追尾模型。WANG 等^[11]借助于高级驾驶模拟器开发了基于运动学的前向碰撞警告算法,同济大学的高保真模拟器可以更真实还原驾驶场景,但是并没有针对紧急制动场景分析驾驶员的制动操纵行为差异。

基于上述问题分析,本文搭建驾驶人数据采集平台进行模拟实验,聚类分析^[12-13]并归纳出3种风格的驾驶人在紧急制动工况下制动行为的差异,对于未来研究基于不同制动行为风格的防追尾预警系统提供理论依据。

1 驾驶人数据采集

1.1 驾驶人制动行为分析

完整的制动过程分为驾驶人反应、制动器起作用、持续制动和放松制动4个阶段,制动踏板力(F_p)、制动减速度(a_b)与制动时间(t)的关系曲线^[14]如图1所示,其中 t_1 为驾驶人反应时间,一般为0.3~1.0 s,包括从感知到需要进行紧急制动的的时间 t'_1 以及移动脚放到制动踏板上的时间 t''_1 ; t_2 为制动器起作用时间,一般为0.2~0.9 s,由于制动蹄和制动鼓之间存在间隙,需要 t'_2 时间制动力才会起作用, t''_2 为制动力增长时间。为了区分驾驶人的制动行为风格,根据驾驶数据,选取可以表征制动行为的制动时间、制动距离、停车间距、最小碰撞时间(Time to Collision, TTC)4个指标进行研究。

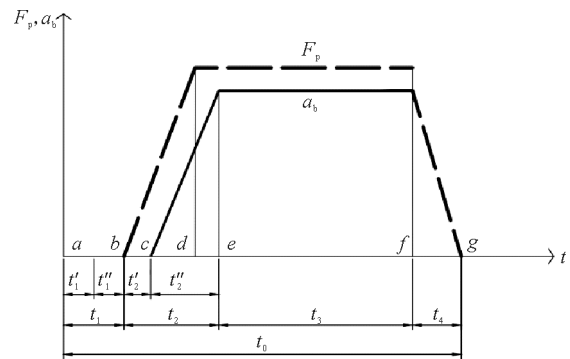


图1 汽车制动过程

1.2 搭建驾驶人数据采集平台

依托驾驶模拟器搭建驾驶人数据采集平台采集驾驶人数据,使用 SCANeR Studio 软件搭建紧急制动仿真场景,利用软件自带的 ANALYSIS 模块直接获取所需驾驶人完整操纵行为数据,以便进行实验分析。

1.3 紧急制动实验

实验条件设置如下:

- 1) 环境条件设定。由于需要测试在良好路况下的驾驶人紧急制动模型,因此天气选择日间晴天无风。
- 2) 道路设定。所有场景均是高速公路双向两车道,对向车道无车,道路中间设有防护栏,车道宽度3.5 m,不考虑应急车道。
- 3) 路面附着系数设定。路面附着系数的设定参照日本、欧盟等实验以及相关法规规定设定,设置为1.0,且当前大多数城市路面情况良好,在非湿地、结冰等特殊天气情况下,均能够达到1.0的路面附着系数。
- 4) 制动条件设定。车辆最大制动力和制动力曲线参照 SCANeR 默认设定。
- 5) 车辆动力学模型。车辆动力学模型采用 SCANeR 自带的默认动力学模型,包含各类物理约束以及运动反馈。
- 6) 其余设置,如他车物理模型、道路边缘物理反馈、方向盘力反馈、驾驶舱力反馈等,均采用驾驶模拟

平台默认设定。

紧急制动场景设置如下:

1) 在双向两车道且无其他车辆干扰的路况下,前车以 120 km/h 的速度行驶,驾驶人在后方驾驶车辆以初始车速 100 km/h 的速度行驶,两车相距 300 m。驾驶人驾驶车辆自行加速,当车速到达 120 km/h 时,前车以 0.6g(g 为重力加速度)的减速度减速直至车辆停止,要求驾驶人自主选择时机完成紧急制动过程,待车辆完全停止后结束实验。

2) 因重复实验容易导致驾驶人产生心理预期,本实验只进行 1 次,实验前要求驾驶员在当前车道行驶不能换道,因驾驶员误操作导致车辆未完全停止、制动时间过长或者产生换道行为需要重新实验,实验过程中不会告知驾驶员前车制动触发条件。

招募 36 位驾驶经验丰富的驾驶人参与实验,包括 30 名男性及 6 名女性,年龄在 36~40 岁,驾龄均在 5 年以上,驾驶里程超过 5000 km。正式测试之前会让驾驶人熟悉驾驶模拟器相关操作,在驾驶测试过程中,被试者没有表现出药物作用、疲劳驾驶或酒后驾驶等不良反应,且在实验过程中对驾驶模拟器表现出良好的适应能力。模拟时使用 RECORD 进程记录驾驶人紧急制动的数据。本实验数据采集频率为 100 Hz,采集车辆完整制动过程中时间、制动踏板、位置、速度、加速度等有效数据,制动开始时刻部分数据如表 1 所示,其中纵向是指车辆行驶方向,横向是指与车辆行驶方向垂直的方向。实验开始后 22.44 s,驾驶人踩制动踏板开始制动行为。

表 1 驾驶数据

时间/s	制动踏板力/N	纵向			横向速度/(km·h ⁻¹)
		位置/m	速度/(km·h ⁻¹)	加速度/(m·s ⁻²)	
22.43	0.00	799.09	122.90	-0.40	0.33
22.44	30.19	799.44	122.89	-0.41	0.33
22.45	32.38	799.77	122.87	-0.72	0.33
22.46	32.38	800.12	122.83	-1.10	0.33
22.47	32.38	800.46	122.79	-1.35	0.32
22.48	32.38	800.78	122.74	-1.50	0.32

2 驾驶人风格辨识

2.1 模糊 C 均值聚类算法

考虑到本文采集的样本数据类别多且杂,彼此之间并无明确联系,采用模糊聚类的方法可以更准确地表达聚类效果,因此使用模糊 C 均值(Fuzzy C-Mean,FCM)聚类算法进行驾驶人风格的分类识别。FCM 算法主要流程如下:

1) 假定数据集 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\} = \{\{x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1N}\}, \{x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2N}\}, \dots, \{x_{n1}, x_{n2}, \dots, x_{nN}\}\}$, 其中 n 为样本总数, N 为样本维度。将数据集 X 分成 c 个类型,使用 $c \times n$ 的隶属矩阵 $U = [\mu_{ij}]$ 表示对象与类型之间的隶属关系,其中 μ_{ij} 表示第 j 个对象属于第 i 个类型的隶属程度。定义目标函数和约束条件:

$$L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^c \mu_{ij}^m \|X_i - c_j\|^2 \tag{1}$$

$$\sum_{j=1}^c \mu_{ij} = 1 \tag{2}$$

式中: L 为目标函数; $\|X_i - c_j\|$ 为数据对象与聚类中心的欧几里得距离; m 为控制模糊程度的加权指数, m 越大越模糊,一般默认取 2。

为了方便求解,引入 n 个拉格朗日乘子 λ ,得到新的目标函数:

$$L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^c \mu_{ij}^m \|X_i - c_j\|^2 + \sum_{i=1}^n \lambda_i (\sum_{j=1}^c \mu_{ij}^m - 1) \tag{3}$$

2) 分别对该目标函数其中的 2 个变量 μ_{ij} 和 c_j 求导,得到隶属度矩阵和聚类中心的更新方程:

$$\mu_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^c \left(\frac{\|X_i - c_j\|}{\|X_i - c_k\|} \right)^{\frac{2}{m-1}}} \tag{4}$$

$$c_j = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{ij}^m X_i}{\sum_{i=1}^n \mu_{ij}^m} \tag{5}$$

3) 重复步骤 1)和 2),直至目标函数收敛。

2.2 基于制动行为的驾驶人分类

通过实验得到由 36 名驾驶人所构成的数据集 \mathbf{X} 为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{q1} & x_{q2} & \cdots & x_{qp} \end{bmatrix} \tag{6}$$

式中: p 为研究的指标(制动时间、制动距离、停车间距、最小碰撞时间),取 $p=4$; q 为研究对象,取 $q=36$ 。

为了便于聚类分析,对驾驶数据进行归一化处理,归一化后的数据集为 $Y=(y_{ij})_{p \times q}$,其中:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{j\min}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad i = 1, 2, 3, \dots, 36; j = 1, 2, 3 \tag{7}$$

式中: i 为驾驶员数量; j 为驾驶风格类别数; $x_{j\max}$ 、 $x_{j\min}$ 分别为第 j 列驾驶数据的最大值和最小值。

基于 FCM 算法对数据集 Y 进行聚类,通过将聚类数目分别设置为 2、3、4、5 对比聚类效果,发现当设定聚类数目 $c=3$ 时,聚类最清晰,效果最好。设置模糊参数 $m=2$,最大迭代次数为 100,迭代停止时的最小增量为 10^{-5} 。迭代过程中目标函数变化过程见图 2。

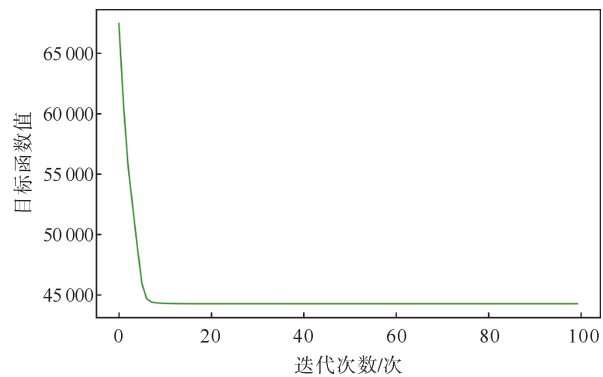


图2 目标函数变化曲线

由图 2 可以看出,目标函数迭代 7 次左右就已经收敛,说明算法聚类效率较高,可以在较短时间内得到聚类结果。

在通过聚类得到的隶属度矩阵 \mathbf{U} 中,每一列的数值分别表示该驾驶人对于每一类型的隶属度,即 μ_{ij} 表示第 i 名驾驶人对于第 j 类的隶属度 ($i=1, 2, 3, \dots, 36; j=1, 2, 3$),如当 $\mu_{i1} > \max\{\mu_{i2}, \mu_{i3}\}$ 时,表示第 i 名驾驶人隶属于第 1 类制动行为风格,以此类推。通过提取矩阵每一行中最大值的索引(从 0 开始),获得聚类标签 $\text{label}=[2\ 0\ 0\ 0\ 2\ 0\ 2\ 0\ 2\ 2\ 0\ 2\ 2\ 0\ 2\ 0\ 1\ 2\ 2\ 2\ 1\ 2\ 2\ 2\ 1\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 2\ 1\ 2\ 1]$,相同的索引值代表相同的类别,由索引值 0、1、2 可将驾驶人分成 3 类,如表 2 所示。

表 2 驾驶人类型划分

类型	驾驶人编号	总计
1	2、3、4、6、8、11、14、16、27、32	10
2	17、21、25、26、28、29、30、31、34、36	10
3	1、5、7、9、10、12、13、15、18、19、20、22、23、24、33、35	16

以制动时间、制动距离、停车间距为视角,绘制聚类效果图,由图 3 可知,驾驶人数据清晰地聚成 3 类,彼此围绕聚类中心点分布,由此很容易进行制动行为风格辨识。

为了区分驾驶人所属类型的制动行为风格,对驾驶人的制动参数取均值进行分析,如表 3 所示。

制动行为风格评价指标没有统一的选取标准^[15],选取的评价指标越多,表征驾驶员的制动行为风格就越全面,表 3 所示的制动参数作为评价指标能够达到风格辨识要求。不同驾驶员由于个性、年龄差异,其在制动时的反应时间和操纵行为会存在明显的区别,其中制动时间和制动距离越大,风格从保守过渡到一般趋向于激进;停车间距越小,风格从激进过渡到一般趋向于保守。TTC 与驾驶员对危险的判断程度相关性很高,可以明显表征各类驾驶员的制动行为风格,由于 TTC 在整个制动过程中是时刻变化的,这

里将最小 TTC 作为评价指标,最小 TTC 越小,风格越激进,反之则越保守,为避免相对速度接近 0 时 TTC 趋近于无穷大的问题,取 TTC 的倒数值 TTCR 来代替。通过以上分析,将类型 1 定义为激进型驾驶人,类型 2 定义为保守型驾驶人,类型 3 定义为一般型驾驶人。

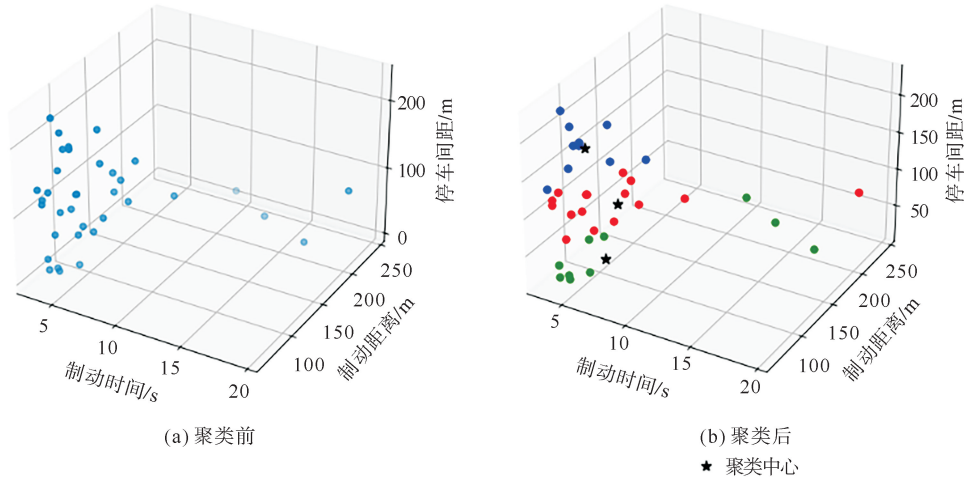


图 3 聚类效果

基于上述分类结果,将 36 位驾驶人制动行为风格重新归类,结果如表 4 所示。

由表 4 可以看出,保守型驾驶人和激进型驾驶人数量一致,一般型驾驶人占比较多,这符合日常人们对于驾驶人制动行为风格的认知,在不考虑数据量的情况下,说明本文对驾驶人制动风格辨识正确。

3 制动行为风格研究

根据驾驶人数据采集平台采集到的紧急制动场景中前车制动开始时前 5 s 和后 30 s 的制动踏板力、速度、加速度和 TTCR 数据,借助 Matlab 软件计算前车制动开始时刻采集到的驾驶车辆数据的平均值来拟合曲线,分别绘制保守型、一般型、激进型 3 类驾驶人的制动踏板力、速度、加速度、TTCR 与时间的分布曲线,如图 4—7 所示。由于采集平台采样频率为 100 Hz,故时间轴采用 0.01 s 为单位。

3.1 制动踏板力-时间分布

图 4 中,“+”“○”“×”符号分别表示保守型、一般型、激进型驾驶人驾驶车辆制动过程中开始制动时刻,分别为 6.90、6.94 和 8.15 s。根据图 4 可知,激进型驾驶人选择制动的时刻更晚,保守型驾驶人会选择更早的时刻进行制动,而且保守型驾驶人制动踏板踩得更深,制动踏板力更大。说明保守型驾驶人在遇到紧急制动状况下会更早地选择刹车而且刹车踏板踩得较深,会更快地让车辆停下来避免追尾的发生。保守型驾驶人制动曲线波动较小、较平稳,说明

表 3 各类型驾驶人制动参数

类型	制动时间/s	制动距离/m	停车间距/m	最小碰撞时间/s
1	7.03	120.95	22.88	0.68
2	5.14	96.99	151.71	2.38
3	5.81	98.36	100.29	1.53

表 4 驾驶人制动行为风格分类

类型	制动行为风格	驾驶人编号
1	激进型	2、3、4、6、8、11、14、16、27、32
2	保守型	17、21、25、26、28、29、30、31、34、36
3	一般型	1、5、7、9、10、12、13、15、18、19、20、22、23、24、33、35

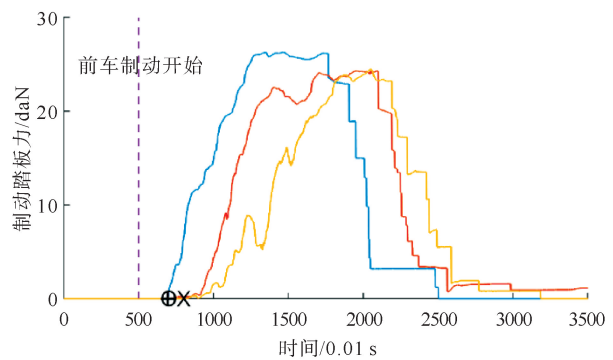


图 4 制动踏板力-时间分布曲线
—保守型; —一般型; —激进型

保守型驾驶人制动行为比较相近,而激进型驾驶人制动曲线波动较大,说明激进型驾驶人驾驶过程中任意度较大。

3.2 速度-时间分布

图5中,“+”“○”“×”符号分别表示保守型、一般型、激进型驾驶人驾驶车辆制动过程中制动结束时刻,分别为16.85、19.87和24.68 s。根据图5速度曲线可以看出保守型、一般型、激进型驾驶人从开始减速到车辆停下来所用的时间在逐渐加长;曲线变化趋势也验证了保守型驾驶人会更早地进行制动行为。

3.3 加速度-时间分布

图6中,“+”“○”“×”符号分别表示保守型、一般型、激进型驾驶人驾驶车辆制动过程中加速度最大点,分别为 -7.12 、 -7.91 和 -6.82 m/s^2 。图6加速度-时间曲线表明激进型驾驶人相较于其他两种类型驾驶人的制动减速度要偏小,但制动周期更长,说明此类驾驶人往往会选择较小的制动减速度进行长时间的减速行为,此时车辆的平顺性较好,驾驶体验更舒适,但也导致车辆停止时与前车的距离较近,增加追尾的风险。

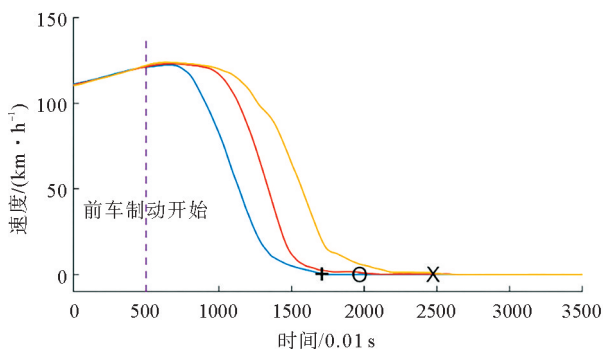


图5 速度-时间分布曲线
—保守型; —一般型; —激进型

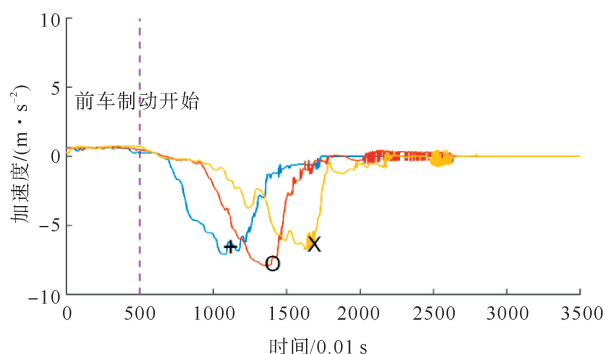


图6 加速度-时间分布曲线
—保守型; —一般型; —激进型

3.4 TTCR-时间分布

图7中,“+”“○”“×”符号分别表示保守型、一般型、激进型驾驶人驾驶车辆制动过程中TTCR最大即TTC最小的时刻,3个TTC值分别为2.49、1.61和0.74 s。根据TTCR-时间曲线可以发现,保守型驾驶人在紧急制动过程中会选择更安全的制动行为,并且会提前避险;激进型驾驶人的制动行为会更加迟滞,说明此类驾驶人的驾驶行为会较长时间处于不安全状态,遇到突发状况更容易产生危险。

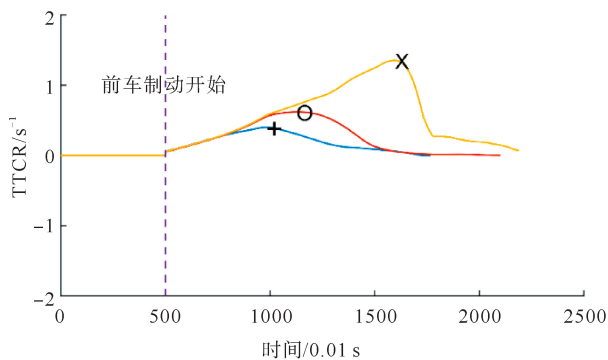


图7 TTCR-时间分布曲线
—保守型; —一般型; —激进型

4 结论

通过模糊C均值聚类算法将驾驶人在紧急制动工况下的制动行为风格分为保守型、一般型和激进型3类,对3类驾驶特性的制动数据进行归类分析,得出以下结论:

- 1) 保守型驾驶人会选择更早的制动,而且制动减速度更大,制动持续时间更短,驾驶人的制动行为比较相近,制动过程较平稳和安全;
- 2) 激进型驾驶人会选择较晚时间进行制动,制动减速度较小,制动持续时间较长,驾驶人的驾驶行为

任意性较大,且会长时间处于危险状态,不利于行车安全,但制动过程平顺性较好。

参考文献(References):

- [1] WU S,WANG W,LI Z,et al. A collision warning device based on the emergency braking behavior prediction[C]//Man-Machine-Environment System Engineering,Singapore:Springer,2018;415-422.
- [2] 薛晴婉,徐嘉伟,闫学东,等.雾天驾驶人车辆操纵行为特性及其与追尾风险相关性分析[J].交通信息与安全,2022,40(1):19-27.
XUE Qingwan,XU Jiawei,YAN Xuedong,et al. A study on the correlation between vehicle control behaviors and rear-end collision risk under foggy conditions[J]. Journal of Transport Information and Safety,2022,40(1):19-27.
- [3] 吕能超,郑梦凡,郝威,等.基于客观风险感知特性的前向碰撞预警算法优化与标定[J].交通运输工程学报,2020,20(2):172-183.
LYU Nengchao,ZHENG Mengfan,HAO Wei,et al. Forward collision warning algorithm optimization and calibration based on objective risk perception characteristic[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2020,20(2):172-183.
- [4] 洪家乐,曲大义,贾彦峰,等.基于驾驶人反应特性的车辆跟驰行为及模型[J].青岛理工大学学报,2021,42(4):108-114.
HONG Jiale,QU Dayi,JIA Yanfeng,et al. Car-following behavior and model based on driver response characteristics[J]. Journal of Qingdao University of Technology,2021,42(4):108-114.
- [5] 武帅,陈秀锋,高艳艳,等.雾天环境下驾驶行为特性研究[J].青岛理工大学学报,2019,40(5):101-105.
WU Shuai,CHEN Xiufeng,GAO Yanyan,et al. Study on driving behavior characteristics in foggy environment[J]. Journal of Qingdao University of Technology,2019,40(5):101-105.
- [6] 聂蕊蕊,范宜卿,陈秀锋,等.考虑驾驶风格的高速公路雾天限速研究[J].青岛理工大学学报,2023,44(1):110-116.
NIE Ruirui,FAN Yiqing,CHEN Xiufeng,et al. Study on the speed limit of expressways in foggy weather considering driving styles[J]. Journal of Qingdao University of Technology,2023,44(1):110-116.
- [7] 胡均平,刘镇,李勇成.汽车驾驶员自适应防碰撞预警系统设计[J].计算机仿真,2017,34(11):107-113.
HU Junping,LIU Zhen,LI Yongcheng. Car driver adaptive collision warning system design[J]. Computer Simulation,2017,34(11):107-113.
- [8] 陈计伟,史志才,刘瑾,等.道路交通行车安全预警算法研究[J].电子测量技术,2019,42(5):6-10.
CHEN Jiwei,SHI Zhicai,LIU Jin,et al. Research on early warning algorithm of driving safety about road traffic[J]. Electronic Measurement Technology,2019,42(5):6-10.
- [9] 秦雅琴,胡浩玮,蒋玉博.动、静态驾驶适宜性相关性分析[J].安全与环境学报,2019,19(5):1643-1648.
QIN Yaqin,HU Haowei,JIANG Yubo. On the correlation analysis of the dynamic and static driving suitability[J]. Journal of Safety and Environment,2019,19(5):1643-1648.
- [10] LUO Q,CHEN X,YUAN J,et al. Study and simulation analysis of vehicle rear-end collision model considering driver types[J]. Journal of Advanced Transportation,2020(1):1-11.
- [11] WANG X S,CHEN M,ZHU M X,et al. Development of a kinematic-based forward collision warning algorithm using an advanced driving simulator[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2016,17(9):2583-2591.
- [12] DAS A,KHAN M N,AHMED M M,et al. Cluster analysis and multi-level modeling for evaluating the impact of rain on aggressive lane-changing characteristics utilizing naturalistic driving data[J]. Journal of Transportation Safety Security,2022,14(12):2137-2165.
- [13] CHEN S,CHENG K,YANG J,et al. Driving behavior risk measurement and cluster analysis driven by vehicle trajectory data[J]. Applied Sciences,2023,13(9):5675.
- [14] 余志生.汽车理论[M].北京:机械工业出版社,2009.
YU Zhisheng. Automobile theory[M]. Beijing:China Machine Press,2009.
- [15] 王科银,杨亚会,王思山,等.驾驶风格聚类与识别研究[J].湖北汽车工业学院学报,2021,35(3):1-6.
WANG Keyin,YANG Yahui,WANG Sishan,et al. Research of clustering and recognition for driving style[J]. Journal of Hubei University of Automotive Technology,2021,35(3):1-6.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)