

# 驾驶员前向避撞行为特征的降维及多元方差分析

王雪松, 朱美新, 陈 铭

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 驾驶员在追尾临撞工况下的避撞过程可以分为多个阶段(如制动前、制动后),而在每一阶段中,又存在多个分析角度(如制动快慢、制动力度)及不同的关键时刻与特征值,因此系统描述驾驶员的避撞行为需要多种参数.对多种避撞行为参数进行降维处理,并探究工况紧急程度对每类参数的综合影响.利用同济大学8自由度高仿真驾驶模拟器,研究驾驶员在不同前车减速度(0.30g, 0.50g, 0.75g)和不同初始车头时距(1.5s, 2.5s)下的避撞行为,全面记录了驾驶员危险感知、油门释放和刹车制动等避撞行为参数.利用主成分分析对众多参数进行降维处理,将避撞行为特征划分为感知反应、制动延误、制动力度3个方面,并通过多元方差分析探究车头时距、前车减速度及二者交互项对这3个方面的影响.结果表明,驾驶员感知反应受到车头时距和前车减速度同时影响,制动延误受到车头时距、前车减速度以及二者交互项的影响,制动力度则仅受到前车减速度的影响.在变化趋势上,随着工况紧急程度的增加,驾驶员的感知反应越快,制动延误越短,而制动力度越大.

**关键词:** 驾驶模拟器; 前向避撞行为; 数据降维; 多元方差分析

中图分类号: U491.6

文献标志码: A

## Dimension Reduction and Multivariate Analysis of Variance for Drivers' Forward Collision Avoidance Behavior Characteristics

WANG Xuesong, ZHU Meixin, CHEN Ming

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

**Abstract:** The process of collision avoidance under rear-end scenarios can be divided into several stages (e. g., pre-brake and post-brake). In each stage, different analysis perspectives (e. g., brake delay and brake intensity) exist, and different key time moments and measurements can be defined. Therefore, lots of parameters are involved in systematically describing drivers' collision avoidance

behaviors. Studies that focused on a certain parameter can only give information on a specified parameter rather than the underlying behavioral patterns behind the parameters. This study did dimension reduction analyses for the multiple parameters of collision avoidance behaviors, and investigated the impacts of situational urgency on each type of parameters. The high fidelity Tongji University driving simulator was used to test drivers' collision avoidance behaviors under different initial headways (1.5 s, 2.5 s) and different lead vehicle (LV) deceleration rates (0.30g, 0.50g, 0.75g). Parameters characterizing drivers' hazard perception, throttle releasing and braking process were recorded. Dimension reduction analyses on collision avoidance behaviors was conducted with principal component analysis, which generalized collision avoidance behaviors into three aspects: perception response, braking delay and braking intensity. Multivariate analysis of variance was applied to investigate how initial headway and LV deceleration affect these three aspects. Results showed that perception response was affected by both initial headways and LV deceleration; braking delay was affected by initial headway, LV deceleration and their interaction simultaneously; and braking intensity depended solely on lead vehicle's deceleration. As situational urgency increased, drivers responded faster and braked to maximum more quickly, and braked harder.

**Key words:** driving simulator; forward collision avoidance behavior; dimension reduction; multivariate analysis of variance

追尾事故在事故总数中所占比例非常高,在国外,占25%~40%<sup>[1]</sup>;在上海,占20%,而在高速公路和隧道中,上升到49%和67%<sup>[2]</sup>.前向避撞报警系统(FCW)能有效减少追尾事故.前向避撞报警过程是车载系统与驾驶员人机交互的过程,深入理解驾驶员在临撞工况下的避撞行为是开发有效的

收稿日期: 2015-11-12

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年基金(51522810);“十二五”国家科技支撑计划(014BAG01B03)

第一作者: 王雪松(1977—),男,教授,工学博士,主要研究方向为交通安全、交通统计分析、驾驶行为与车辆主动安全、驾驶模拟器应用.

E-mail: wangxs@tongji.edu.cn

FCW 系统的必要条件<sup>[3-4]</sup>.

一个典型的刹车避撞过程可以描述为:前车突然减速、驾驶员察觉危险、释放油门踏板、开始制动、持续减速、制动至最大踏板压力、成功避险或发生碰撞.这一过程可以分为制动前反应和制动后反应 2 个阶段.针对某个阶段,从不同的角度出发,将得到不同的避撞行为参数;从同一个分析角度,定义不同的关键时刻或特征值,亦可以提取不同的避撞行为参数.以制动后反应阶段为例,可以从驾驶员制动至最大刹车踏板压力的快慢及制动力度 2 个角度进行分析.在制动快慢方面,有制动至 25%和 50%、最大踏板压力时间等参数.在制动力度方面,有制动过程最大减速度、最大刹车踏板压力等参数<sup>[5]</sup>.由此可见,系统地描述驾驶员在临撞工况下的避撞行为涉及众多参数.

针对多个避撞行为参数,既有研究大多采用一元方差分析(因变量个数为 1)对单个参数(如感知反应时间<sup>[6]</sup>、最大刹车踏板压力<sup>[7]</sup>)进行分析.此类研究方法主要存在如下问题:①多次使用一元方差分析,会增大犯 I 类错误(把本无差别的多个总体均数判为有差别)的概率;②一元方差分析只能分析单个具体参数的差异,而无法研究某一类避撞行为参数的差异.由于避撞行为参数众多,这种单个变量的分析方法只能得到比较局部的信息.

考虑到避撞过程包括制动前的感知反应过程以及制动后的刹车行为,各种避撞行为参数之间由于时间上的连续性,往往存在一定的相关性,因此可以通过降维的方法将避撞行为参数划分为互不相关的几类.然后运用多元方差分析对每类参数的影响因素进行分析.

## 1 避撞行为研究综述

研究临撞工况下的避撞行为前,首先要提炼出典型的临撞工况,以便于试验场景的构建. Najm 等<sup>[8]</sup>利用美国事故数据库(包括 General Estimates System, National Motor Vehicle Crash Causation Survey 和 Event Data Recorder)提炼了前车静止、前车突然减速、前车低速行驶 3 类典型前向临撞工况.

针对避撞行为研究,主要有驾驶模拟与实车试验 2 种手段.在美国的碰撞避免多方合作项目(CAMP)中, Kiefer 等<sup>[9]</sup>基于实车试验构造了前车静止与前车运动 2 种临撞工况,研究了不同前车减速度和不同后车逼近速度下驾驶员的“最后 1 秒”刹

车行为,在此基础上构造了基于运动学的前向避撞预警算法;Curry 等<sup>[10]</sup>在美国国家高级驾驶模拟器中重现了 CAMP 项目的刹车试验,以研究驾驶模拟器数据与实车测试数据之间的相关性;Lee 等<sup>[11]</sup>利用爱荷华驾驶模拟器测试了当前车以最大减速度制动时(例如, 0.85g)FCW 系统能否有利于避免事故的发生,结果表明在有 FCW 警告的情况下:①驾驶员在较短初始车头时距条件下发生更少的事故;②本车与前车的碰撞车速明显降低;③驾驶员释放油门踏板的速度更快;④释放油门和踩刹车时的车头时距增大.

在上述研究基础上,McGehee 等<sup>[12]</sup>测试了无报警、早期报警、晚期报警条件下驾驶员的避撞行为参数,结果表明,比起无报警和晚期报警条件,早期报警能缩短油门释放反应时间,减少事故发生,降低事故严重程度,说明了预警时机的重要性;Scott 和 Gray<sup>[13]</sup>利用驾驶模拟器测试了不同预警方式(无预警、声音、图像、触觉)下驾驶员的感知反应时间,结果表明,触觉报警方式下驾驶员的感知反应时间最短.

综上,既有研究关注于有无报警、不同报警时机、不同报警方式下驾驶员感知反应时间、油门踏板释放时间的差异分析,存在以下可以改善的方面:①在避撞行为过程上,已有研究大多关注于前车制动至后车开始刹车这一段时间内的避撞行为参数(如感知反应时间、油门踏板释放时间),而对开始刹车后的避撞行为参数(如制动至最大踏板压力时间、最大刹车踏板压力值)分析较少;②在分析角度上,工况的紧急程度是影响驾驶员避撞行为的一个重要因素<sup>[14]</sup>,而既有研究对此关注较少;③在分析方法上,已有研究局限于对单一避撞行为参数进行分析,而缺乏同时对多个参数或一类参数进行分析.

## 2 临撞工况试验

### 2.1 试验人员

29 名持有有效驾照的驾驶员参加了“临撞工况下驾驶行为试验”,驾驶员年龄分布在 23~54 岁之间(平均值 33,标准差 8.7),其中男性 23 名,女性 6 名.有 4 位驾驶员在试验过程中出现轻微不适症状,因此补充了 4 位驾驶员作为替代者,所有驾驶员的驾驶里程均超过了 1 万 km.

### 2.2 测试工况与条件

利用同济大学 8 自由度高仿真驾驶模拟器<sup>[5]</sup>测试

了发生频率高且最易造成危险的一类前向碰撞工况<sup>[8]</sup>:前车突然减速工况.在工况触发前,两车处于稳定的匀速跟车状态(相对车速、车头时距均在稳定范围内).工况触发时,前车突然以固定的减速度制动至停止状态,形成危险的碰撞工况.基于中国第一汽车股份有限公司(项目资助方)采集的实车试验数据,采用3种前车减速度条件(即0.30g,0.50g和0.75g)和2种初始车头时距条件(即1.5s和2.5s),最终形成共 $2 \times 3 = 6$ 种不同紧急程度的试验测试条件.

### 2.3 试验流程

试验包含基础信息采集、模拟器试驾、正式试验3个阶段.

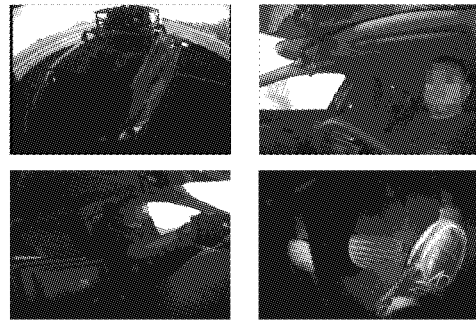
(1) 基础信息采集.测试驾驶员到达驾驶模拟器实验室后,首先在工作人员的辅助下了解试验基本过程、驾驶任务以及试验中可能所涉及到的安全因素,工作人员同时对驾驶员完成基本信息采集.

(2) 模拟器试驾.试驾环节旨在帮助测试人员在短时间内熟悉模拟器,包括基本操作练习、跟车练习及刹车练习.试驾场景采用城市道路数据库,场景中适当社会车辆提高真实度.基本操作练习中包含了启动、加减速、停车、转向(左右各1次)以及变道(左右各1次)练习;跟车练习中选取场长约1.5 km的直线路段,要求驾驶员跟随前方车辆行驶,车速约为 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ .在跟车过程中,屏幕上方显示驾驶员当前跟车距离,驾驶员可以根据需要不断改变与前车的距离,以熟悉在模拟器中对前车距离的感知;刹车练习中,驾驶员首先被要求加速至 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,并尝试保持该车速,直至看到前方停止的轻型货车,驾驶员需要按照其正常驾驶的习惯将车辆安全、平稳地停止在前车后方.

(3) 正式试验.在试驾试验之后,如果驾驶员没有任何模拟器眩晕的迹象,那么驾驶员将在5 min的休息时间后开始正式试验.试验全程通过4个车载摄像头监视驾驶员心理与生理状态,如图1 a.

正式试验场景选择一条平原沿海4车道高速公路,天气晴朗、视野良好、对向车流较少,如图1 b.驾驶员首先被要求加速到 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,并且行驶在内侧车道.约2 min后,一辆白色前车会切入到模拟器车辆前,并保持在 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度稳定行驶.此时测试驾驶员需要跟随前车行驶,保持车距在60~80 m,如果驾驶员与前车车距超出了系统设定的最大值(100 m),那么屏幕上方将显示“Speed Up”的提示信息,帮助驾驶员更好地进入跟车状态.在试

验全程中,前车会在不同车头时距(1.5 s, 2.5 s)以不同前车减速度(0.30g, 0.50g, 0.75g)6次减速至静止,形成前车突然减速碰撞工况.2次工况间的时间间隔不等,大约为3 min,且都在初始车头时距条件满足时才触发.为了使驾驶员更难预测前车的减速行为,采用了一些干扰措施,如设置前车尾灯亮起但只发生轻微减速.



a 监控视频显示



b 试验场景

图1 监控视频显示和试验场景

Fig.1 Video monitor displays and experiment scenario

### 2.4 试验数据提取

识别出碰撞过程中的特征时刻(如工况触发、后车开始释放油门、后车开始制动)及特征参数值(如最大刹车踏板压力、最大减速度).提取特征时刻之间的时间间隔以及特征参数值,并结合既有研究,得出如表1所示的碰撞行为参数并对此进行分析<sup>[5]</sup>.在参数计算公式中, $R$ 为两车相对距离, $V_{LV}$ 和 $V_{SV}$ 分别为前车和本车车速.

## 3 避撞行为降维

试验中对碰撞过程中各阶段的关键参数均进行了提取,由于时间上的连续性,这些参数之间存在一定的相关性,其提供的信息存在重叠,因此可以通过数据降维对碰撞行为进行抽象概括.主成分分析作为一种常用的数据降维方法,可以通过构造为数较少的互不相关的“主成分”来反应原变量的绝大部分信息,从而达到数据降维的目的<sup>[15]</sup>.采用主成分分析对

表 1 避撞行为参数定义

Tab.1 Definition of collision avoidance behavior parameters

编号	参数	说明
1	$T_{TC}$	本车与前车的距离碰撞时间(time-to-collision): $T_{TC} = \frac{R}{V_{SV} - V_{LV}}$
2	$\min T_{TC}$	避撞过程中观察到的最小 $T_{TC}$ 值
3	$F_{\max Brake}$	避撞过程中最大刹车踏板压力, N
4	$D_{\max}$	车辆重心最大减速度, $m \cdot s^{-2}$
5	$T_{\text{perception}}$	感知反应时间,工况触发至开始采取避撞措施(制动或变道)所消耗的时间(perception response time)
6	$T_{\text{brake}}$	刹车反应时间,工况触发至开始刹车制动所消耗的时间(braking response time)
7	$T_{\text{initialThrottle}}$	开始释放油门时间,工况触发至开始释放油门踏板所消耗的时间(initial throttle release time)
8	$T_{\text{finalThrottle}}$	完全释放油门时间,开始释放油门至完全释放油门所消耗的时间(final throttle release time)
9	$T_{\text{transition}}$	制动转移时间,完全释放油门到开始踩刹车所消耗的时间(brake transition time)
10	$T_{\text{brake}25}$	制动至 25%踏板压力时间,开始制动至刹车踏板压力达到踏板压力极限(250 N)的 25%所消耗的时间(time to 25% brake)
11	$T_{\text{brake}50}$	制动至 50%踏板压力时间,开始制动至刹车踏板压力达到踏板压力极限(250 N)的 50%所消耗的时间(time to 50% brake)
12	$T_{\text{maxBrake}}$	制动至最大踏板压力时间,开始制动至刹车踏板压力到最大值所消耗的时间(time to maximum brake)

避撞行为参数进行降维处理.

在主成分分析中,最终得到的主成分是原始变量的线性组合.特别地,第 1 个主成分  $P_{C_1}$  是各个原始变量加权后的组合:  $P_{C_1} = a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_k X_k$ ,且能够反映原始数据中的最多方差<sup>[15]</sup>,其中  $a_k$  为权重系数,  $X_k$  为原始变量.第 2 个主成分是正交于第 1 个主成分(即不相关)且能够反映原始数据

中最多方差的原始变量的线性组合.之后的每个主成分也根据此原理类推,理论上可以提取足够多的主成分.

主成分分析中要求各观察变量间具有较高的相关性,表 2 反映了所需要分析的避撞行为参数之间的相关性.

表 2 变量相关性

Tab.2 The correlation between variables

变量	$\min T_{TC}$	$D_{\max}$	$F_{\max Brake}$	$T_{\text{brake}}$	$T_{\text{initialThrottle}}$	$T_{\text{finalThrottle}}$	$T_{\text{transition}}$	$T_{\text{brake}25}$	$T_{\text{brake}50}$	$T_{\text{maxBrake}}$
$\min T_{TC}$	1.000	0.449	-0.527	-0.017	-0.135	-0.043	0.202	-0.057	0.053	-0.098
$D_{\max}$	0.450	1.000	-0.677	-0.065	-0.163	-0.166	0.278	0.002	0.282	0.174
$F_{\max Brake}$	-0.527	-0.677	1.000	-0.092	-0.046	0.100	-0.146	-0.182	-0.337	-0.164
$T_{\text{brake}}$	-0.017	-0.065	-0.092	1.000	0.610	0.365	0.205	0.396	0.406	0.225
$T_{\text{initialThrottle}}$	-0.135	-0.163	-0.046	0.610	1.000	-0.154	-0.436	0.066	0.069	0.037
$T_{\text{finalThrottle}}$	-0.043	-0.165	0.100	0.365	-0.154	1.000	-0.132	0.268	0.179	0.112
$T_{\text{transition}}$	0.202	0.278	-0.146	0.205	-0.436	-0.132	1.000	0.221	0.307	0.161
$T_{\text{brake}25}$	-0.057	0.002	-0.182	0.396	0.066	0.268	0.221	1.000	0.688	0.627
$T_{\text{brake}50}$	0.053	0.282	-0.337	0.406	0.069	0.179	0.307	0.688	1.000	0.786
$T_{\text{maxBrake}}$	-0.098	0.174	-0.164	0.225	0.037	0.112	0.161	0.627	0.786	1.000

根据表 2 可以发现,除了完全释放油门变量 ( $T_{\text{finalThrottle}}$ ) 外,其余变量均与观察变量中的 1 项或若干项变量有显著的相关性.因此,在主成分分析中排除  $T_{\text{finalThrottle}}$  以得到最优的提取结果.

为了选取合适的主成分个数以代表原始数据中的观察变量,通常可以有以下 3 项判断方法<sup>[16]</sup>:

(1) 根据 Kaise-Harris 准则,主成分分析中所保留的主成分的特征值应大于 1.

(2) 根据 Cattell Scree 碎石检验,主成分数量相对应的特征值将配对显示为点图,通常这类图会有一个急剧的下降或跌落,保留下降或跌落以前的部分对应的主成分数量.

(3) 在随机数据集中进行仿真分析,同时也提取对应主成分数量的特征值.若基于真实数据的特征值大于仿真数据所得到的平均特征值,那么对应的主成分也应该予以保留.

图 2 显示了避撞行为参数的主成分分析平行碎石检验.根据以上 3 项判定条件,主成分数均应该选定为 3.

表 3 中列出了 3 个主成分的负载系数,即主成分 1( $P_{C_1}$ )、主成分 2( $P_{C_2}$ )和主成分 3( $P_{C_3}$ )的负载系数,同时利用正交旋转使得结果更易解释.表中,  $h_2$ ,  $u_2$  参数分别代表了 3 项主成分所能够解释的原始变量的方差和剩余方差,可以发现绝大多数的原始变

量能够很好地被所提取的主成分所解释,解释度平均约为 0.8 左右.此外,3 项主成分对应整体原始数据的解释度约为 73%,其中主成分 1 在其中占了 41%,主成分 2 为 33%,主成分 3 为 26%.

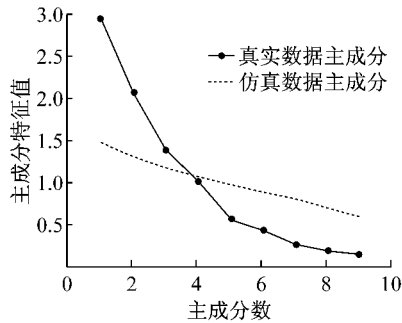


图 2 平行分析碎石检验图  
Fig.2 Parallel analysis scree plots

表 3 主成分分析结果

Tab.3 Results of principal component analysis

变量	负载系数			$h_2$	$u_2$
	$Pc_1$	$Pc_2$	$Pc_3$		
$\min T_{TC}$	-0.12	0.79	-0.07	0.65	0.354
$D_{max}$	0.13	0.83	-0.17	0.73	0.266
$F_{maxBrake}$	-0.18	-0.87	-0.11	0.80	0.201
$T_{brake}$	0.47	0.04	0.67	0.67	0.328
$T_{initialThrottle}$	0.02	-0.05	0.97	0.93	0.066
$T_{transition}$	0.43	0.25	-0.50	0.49	0.508
$T_{brake25}$	0.85	-0.03	0.09	0.73	0.270
$T_{brake50}$	0.90	0.21	0.07	0.86	0.141
$T_{maxBrake}$	0.85	0.01	-0.01	0.73	0.270
方差比例	0.30	0.24	0.19		
累计方差比例	0.30	0.55	0.73		
解释度比例	0.41	0.33	0.26		
累计解释度比例	0.41	0.74	1.00		

表中的对应主成分下的负载系数反映了所提取的主成分与原始变量间的相关性,据此可以对 3 项主成分加以解释.  $Pc_1$  仅与制动转移时间 ( $T_{transition}$ )、制动至 25% 踏板压力时间 ( $T_{brake25}$ )、制动至 50% 踏板压力时间 ( $T_{brake50}$ )、制动至最大踏板压力时间 ( $T_{maxBrake}$ ) 4 项变量显著相关,可以认为反映了驾驶员的“制动延误”,它影响的变量反映了驾驶员从开始制动到刹车踏板达到不同程度压力值之间的时间延误; $Pc_2$  仅与最小碰撞时间 ( $\min T_{TC}$ )、最大刹车踏板压力 ( $F_{maxBrake}$ )、最大减速度 ( $D_{max}$ ) 3 项变量显著相关,可以认为反映了驾驶员的“制动力度”,它所影响的是避撞过程中的工况最危险程度和驾驶员制动峰值特征;而  $Pc_3$  则与刹车反应时间 ( $T_{brake}$ )、开始释放油门时间 ( $T_{initialThrottle}$ )、制动转移时间 ( $T_{transition}$ ) 3 项有显著相关性,可认为代表了工况发生后驾驶员的感知反应,它主要影响了驾驶员对危险状况作出判

断的反应时间.

## 4 避撞行为影响因素分析

避撞行为特征可分为感知反应、制动延误、制动力度 3 个方面.为了探究在不同的工况紧急程度(不同车头时距与前车减速度组合)下,这 3 类参数的变化差异以及各自受哪些因素的显著影响,需要运用方差分析来探求车头时距与前车减速度对各类参数的主效应及交叉效应.

由于各类参数均由多个细化参数组合而成,使得方差分析的因变量个数大于 1,因此常用的一元方差分析不再适用.而多元方差分析(MANOVA)可以被用来分析在不同自变量条件下多项因变量组合的综合差异<sup>[17]</sup>.

采用 MANOVA 方法分析各类避撞行为参数的显著影响因素,在 MANOVA 分析过程中,采用 Hotelling-Lawley 检验计算  $F$ -test 值并检验显著性.在 MANOVA 之后,针对各类避撞行为细化参数,运用单变量独立  $F$ -test 探究细化参数的显著影响因素.

在驾驶模拟器试验中,通过设计不同等级的初始车头时距(1.5 s 与 2.5 s)和前车减速度(0.30g, 0.50g 和 0.75g),产生了不同紧急程度的临撞工况.实际采集得到数据中事件触发时的车头时距并不与设计的一致,因此对车头时距条件重新划分为“<1.0 s”,“[1.0 s, 1.5 s)”和“[1.5 s, 2.5 s]”,分别对应短、中等和长车头时距条件.

### 4.1 感知反应

表 4 列出了感知反应类参数的检验结果,这类参数在不同前车减速度和车头时距下均有显著的差异.

表 4 感知反应类参数 MANOVA 检验结果

Tab.4 MANOVA test results for perception response parameters

自变量	自由度	Hotelling-Lawley 值	调整 $F$ 值	$P$ 值
前车减速度	2	0.222 3	5.07	$5.90 \times 10^{-5}$
车头时距	2	0.306 3	6.99	$6.20 \times 10^{-7}$
交互项	4	0.048 1	0.55	0.88
残差	140			

表 5 为 3 项感知反应类参数的独立  $F$ -test 检验结果.结果表明,驾驶员的刹车反应时间 ( $T_{brake}$ ) 和开始释放油门时间 ( $T_{initialThrottle}$ ) 显著受到车头时距影响,反映车头时距条件与驾驶员的感知有直接联系.

表 5 感知反应类参数单变量  $F$ -test 结果

Tab.5 Single variable  $F$ -test results for perception response parameters

自变量	$T_{brake}$			$T_{initialThrottle}$			$T_{transition}$		
	平方总和	平方和均值	$P$ 值	平方总和	平方和均值	$P$ 值	平方总和	平方和均值	$P$ 值
前车减速度	12.4	6.21	$4.20 \times 10^{-5}$	2.2	1.12	0.12	5.9	2.969	0.001 9
车头时距	19.9	9.94	$1.90 \times 10^{-7}$	11.3	5.64	$4.90 \times 10^{-5}$	0	0.007	0.984 4
交互项	1.7	0.42	0.57	1.3	0.32	0.66	0.4	0.103	0.923 4
残差	80.3	0.57		74.0	0.53		63.6	0.454	

此外,  $T_{brake}$  和制动转移时间 ( $T_{transition}$ ) 同时受前车减速度影响, 这意味着前车速度下降的快慢能够被后车驾驶员感知, 从而影响其反应时间。

图 3 展示了不同车头时距和前车减速度下感知

反应类参数的均值. 在总体趋势上, 随着前车减速度的增大及初始车头时距的减少, 感知反应类参数有着明显的下降趋势. 即当工况的紧急程度越高时, 驾驶员的感知反应越快。

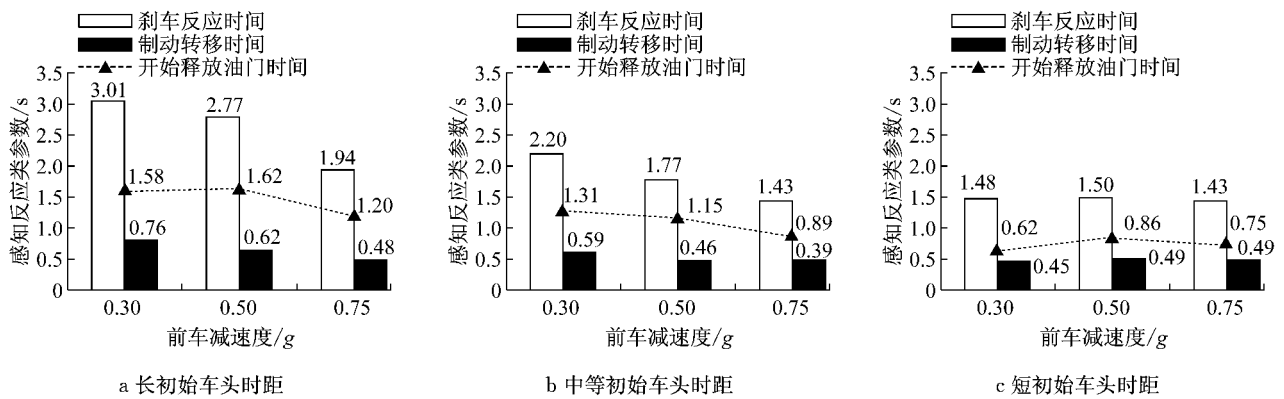


图 3 不同车头时距与前车减速度下感知反应类参数均值

Fig.3 Hazard perception parameters for different initial headways and different lead vehicle deceleration rates

这一趋势与已有研究的结果一致. Summala 等<sup>[18]</sup>研究了驾驶员在 4 种不同跟车距离及速度组合 (15 m, 30 km · h<sup>-1</sup>; 30 m, 30 km · h<sup>-1</sup>; 30 m, 60 km · h<sup>-1</sup>; 60 m, 60 km · h<sup>-1</sup>) 下的感知反应时间, 同样发现, 距离越近, 驾驶员反应更快. Hulst<sup>[19]</sup>测试了驾驶在 2 种不同的前车减速度 (1 m · s<sup>-2</sup> 与 2 m · s<sup>-2</sup>) 下的感知反应时间, 也发现前车减速度越大, 驾驶员反应越快。

#### 4.2 制动延误

表 6 为制动延误类参数的检验结果. 结果表明驾驶员的制动行为不仅受到前车减速度和车头时距的影响, 同时也受到这 2 项变量的交互项影响。

表 7 揭示了除了制动至 25% ( $T_{brake25}$ ) 时间以

表 6 制动延误参数 MANOVA 检验结果

Tab.6 MANOVA test results for braking delay parameters

自变量	自由度	Hotelling-Lawley 值	调整 $F$ 值	$P$ 值
前车减速度	2	0.387	5.87	$1.30 \times 10^{-5}$
车头时距	2	0.296	4.50	0.000 29
交互项	4	0.359	2.71	0.001 76
残差	94			

外, 驾驶员制动至 50% ( $T_{brake50}$ ) 和最大的刹车踏板压力 ( $T_{maxBrake}$ ) 所需的时间都受到车头时距和前车减速度的交互项影响. 这表明前车减速度和车头时距对于  $T_{brake50}$  和  $T_{maxBrake}$  的影响并非是线性叠加的, 而是: 当车头时距或者前车减速度两者之一处于较极端时 (车头时距偏小或者减速度偏大), 另外一项因素的影响将被弱化。

表 7 制动延误类参数单变量  $F$ -test 结果

Tab.7 Single variable  $F$ -test results for braking delay parameters

自变量	$T_{brake25}$			$T_{brake50}$			$T_{maxBrake}$		
	平方总和	平方和均值	$P$ 值	平方总和	平方和均值	$P$ 值	平方总和	平方和均值	$P$ 值
前车减速度	1.31	0.657	0.002	21.0	10.49	$4.9 \times 10^{-5}$	15.3	7.67	0.028
车头时距	1.96	0.980	0	19.7	9.87	$8.4 \times 10^{-5}$	16.7	8.36	0.020
交互项	0.34	0.085	0.487	24.1	6.04	$1.4 \times 10^{-4}$	24.2	6.05	0.025
残差	9.19	0.098		89.2	0.95		193.7	2.06	

图 4 展示了不同车头时距和前车减速度下制动延误类参数的均值。随着前车减速度的增大及初始车头时距的减少,制动延误类参数有着明显的下降趋势。驾驶员刹车行为方面的研究也发现了这种制

动延误的存在,即驾驶员在开始制动后并不是立即达到最大制动力度,而是存在一定的时间延误<sup>[20]</sup>。但既有研究未分析不同紧急程度下这种制动延误的差异。

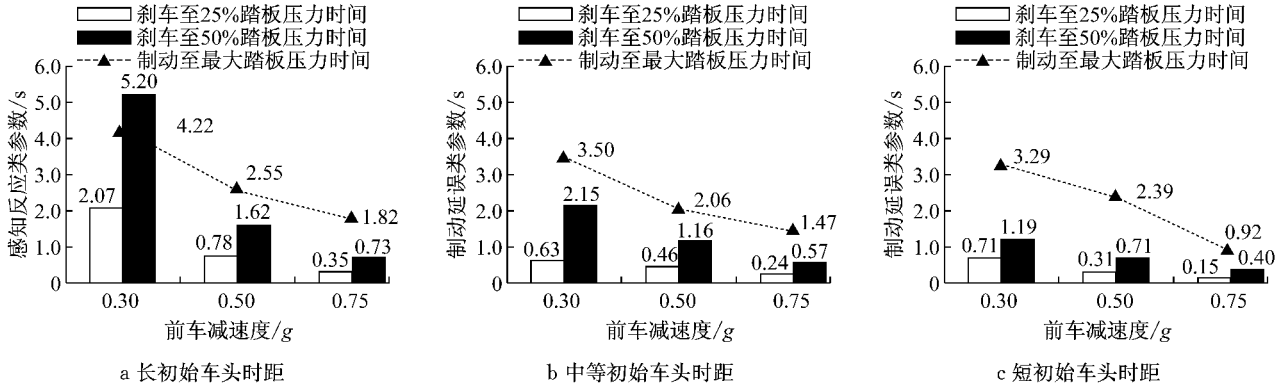


图 4 不同车头时距与前车减速度下制动延误类参数均值

Fig. 4 Braking delay parameters for different initial headways and different lead vehicle deceleration rates

4.3 制动力度

表 8 列出了制动力度类参数的检验结果,揭示了这类参数仅在不同前车减速度的条件下有显著差异。

表 8 制动力度参数 MANOVA 检验结果

Tab. 8 MANOVA test results for braking intensity parameters

自变量	自由度	Hotelling-Lawley 值	调整 F 值	P 值
前车减速度	2	1.573	35.9	$< 2 \times 10^{-16}$
车头时距	2	0.076	1.7	0.11
交互项	4	0.086	1.0	0.47
残差	112			

表 9 列出了针对 3 项风险程度类参数的独立 F-test 检验结果。

表 9 制动力度类参数单变量 F-test 结果

Tab. 9 Single variable F-test results for braking intensity parameters

自变量	$\min T_{TC}$			$D_{\max}$			$F_{\max Brake}$		
	平方总和	平方和均值	P 值	平方总和	平方和均值	P 值	平方总和	平方和均值	P 值
前车减速度	143.1	71.6	$1.2 \times 10^{-14}$	164.7	82.4	$< 2 \times 10^{-16}$	2 938	1 469	$< 2 \times 10^{-16}$
车头时距	9.6	4.8	0.068	4.0	2.0	0.18	136	68	0.028
交互项	5.4	1.4	0.546	7.7	1.9	0.16	82	20	0.359
残差	246.6	1.8		162.6	1.2		2 598	19	

除了最大刹车踏板压力( $F_{\max Brake}$ )受到前车减速度和车头时距的同时影响,其余 2 项代表制动力度的变量仅受到前车减速度的影响。

刹车踏板压力及最大减速度的均值,二者均随着前车减速度的增加而增大。说明工况紧急程度越高,驾驶员制动力度越大。

图 5 展示了不同车头时距和前车减速度下最大

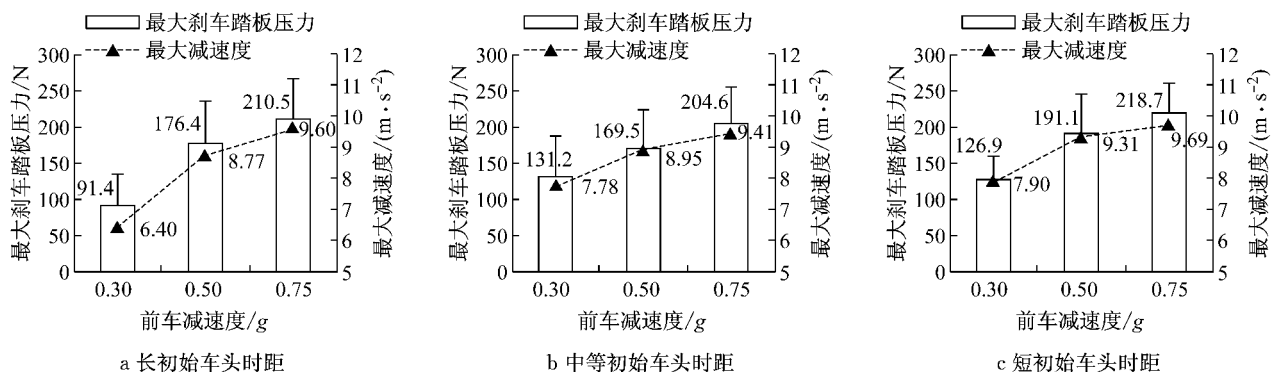


图 5 不同车头时距与前车减速度下制动力度类参数均值

Fig. 5 Braking intensity parameters for different initial headways and different lead vehicle deceleration rates

表 10 汇总了 3 类参数在 ANOVA 与 MANOVA 分析中的主要结果.

表 10 ANOVA 与 MANOVA 结果总结

Tab.10 Summarization of ANOVA and MANOVA results

自变量	制动力度参数			感知反应参数			制动延误参数		
	$\min T_{TC}$	$D_{\max}$	$F_{\max Brake}$	$T_{brake}$	$T_{initial Throttle}$	$T_{transition}$	$T_{brake25}$	$T_{brake50}$	$T_{\max Brake}$
ANOVA 主效应									
车头时距			✓	✓	✓			✓	✓
前车减速度	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓
MANOVA 效应									
车头时距		✓	✓						
前车减速度	✓	✓	✓						
交互项			✓						

注:✓代表 ANOVA 或 MANOVA 分析中影响因素效应在 95%置信区间内显著.

汇总结果表明,驾驶员的感知反应受到车头时距和前车减速度的同时影响,而制动延误受到车头时距、前车减速度以及二者交互项的影响,驾驶员的制动力度则仅受到前车减速度的影响.

## 5 结论

利用同济大学 8 自由度驾驶模拟器研究了驾驶员在追尾临撞工况下的避撞行为. 利用主成分分析将避撞行为特征划分为感知反应、制动延误及制动力度 3 个方面,然后利用多元方差分析探究工况紧急程度对每类参数的综合影响. 结果表明,驾驶员的感知反应受到车头时距和前车减速度的同时影响,而制动延误受到车头时距、前车减速度以及二者交互项的影响,驾驶员的制动力度则仅受到前车减速度的影响.

与已有研究相比,本文主要贡献如下:①对刹车后反应序列进行了深入分析;②通过不同车头时距与前车减速度的组合研究了不同工况紧急程度下避撞行为,并分析了车头时距、前车减速度以及二者交互项对各类避撞行为参数的影响.

根据研究结果,FCW 系统设计中应重点考虑 3 类人类因素:①驾驶员感知反应时间,即工况触发至驾驶员开始制动之间的时间;②驾驶员制动延误时间,即驾驶员开始制动与制动至最大刹车踏板压力之间的时间;③驾驶员刹车力度,即制动过程中达到的最大加速度大小.

## 参考文献:

[1] Gilling S P. Collision avoidance, driver support and safety intervention systems [J]. Journal of Navigation, 1997, 50 (1): 27.

[2] 王雪松,石琦,高珍. 基于视频数据的城市隧道交通运行特征与安全研究 [J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(8): 129.  
WANG Xuesong, SHI Qi, GAO Zhen. Urban tunnel traffic operating characteristics and its safety study based on surveillance camera data [J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(8):129.

[3] Wang X, Chen M, Zhu M, *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.

[4] Wang X, Zhu M, Chen M, *et al.* Drivers' rear end collision avoidance behaviors under different levels of situational urgency [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 71: 419.

[5] 王雪松,朱美新,陈铭. 工况紧急程度对驾驶员避撞行为的影响 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2016, 44(6): 876.  
WANG Xuesong, ZHU Meixin, CHEN Ming. Impacts of situational urgency on drivers' collision avoidance behaviors [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2016, 44 (6): 876.

[6] Green M. "How long does it take to stop?" methodological analysis of driver perception-brake times [J]. Transportation Human Factors, 2000, 2(3): 195.

[7] Mazzae E, Barickman F, Forkenbrock G, *et al.* NHTSA light vehicle antilock brake systems research program task 5. 2/5. 3: Test track examination of drivers' collision avoidance behavior using conventional and antilock brakes [R]. Washington D C: Department of Transportaion, National Highway Traffic Safety Administration, 2003.

[8] Najm W G, Toma S, Brewer J. Depiction of priority light-vehicle pre-crash scenarios for safety applications based on vehicle-to-vehicle communications [R]. Washington D C: Department of Transportaion, National Highway Traffic Safety Administration, 2013.

[9] Kiefer R, LeBlanc D, Palmer M, *et al.* Development and validation of functional definitions and evaluation procedures for collision warning/avoidance systems [R]. Washington D C: Department of Transportaion, National Highway Traffic Safety Administration, 1999.

[10] Curry R C, Greenberg J A, Kiefer R J. NADS versus CAMP



- closed-course comparison examining “last second” braking and steering maneuvers under various kinematic conditions [R]. Washington D C: Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, 2005.
- [11] Lee J, McGehee D, Dingus T, *et al.* Collision avoidance behavior of unalerted drivers using a front-to-rear-end collision warning display on the Iowa driving simulator [J]. Transportation Research Record; Journal of the Transportation Research Board, 1997, 1573: 1.
- [12] McGehee D, Brown T, Lee J, *et al.* Effect of warning timing on collision avoidance behavior in a stationary lead vehicle scenario [J]. Transportation Research Record; Journal of the Transportation Research Board, 2002, 1803: 1.
- [13] Scott J J, Gray R. A comparison of tactile, visual, and auditory warnings for rear-end collision prevention in simulated driving [J]. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 2008, 50(2): 264.
- [14] Summala H. Brake reaction times and driver behavior analysis [J]. Transportation Human Factors, 2000, 2(3): 217.
- [15] Jolliffe I. Principal component analysis [M]. New York: John Wiley & Sons Ltd, 2002.
- [16] Hayton J C, Allen D G, Scarpello V. Factor retention decisions in exploratory factor analysis: A tutorial on parallel analysis [J]. Organizational Research Methods, 2004, 7(2): 191.
- [17] Weinfurt K P. Multivariate analysis of variance [C]// Reading and Understanding Multivariate Statistics. Washington D C: American Psychological Association, 1995;245-276.
- [18] Summala H, Lamble D, Laakso M. Driving experience and perception of the lead car’s braking when looking at in-car targets [J]. Accident Analysis & Prevention, 1998, 30(4): 401.
- [19] Hulst M V D. Anticipation and the adaptive control of safety margins in driving [J]. Ergonomics, 1999, 42(2): 336.
- [20] Ising K W, Droll J A, Kroeker S G, *et al.* Driver-related delay in emergency braking response to a laterally incurring hazard [C]//Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. Santa Monica: Sage Publications, 2012; 705-709.

~~~~~

(上接第 1850 页)

- [11] 万远扬,吴华林,顾峰峰.长江口细颗粒泥沙沉降速度室内试验研究[J].人民长江,2014,45(1):98.  
WAN Yuanyang, WU Hualin, GU Fengfeng. Experimental study on settling velocity of fine sediment in Changjiang River Estuary[J]. Yangtze River, 2014, 45(1):98.
- [12] Richardson J F. Sedimentation and fluidisation of fine particles and two component mixtures of solids[J]. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, 1961, 39(5): 348.
- [13] 王兆印,宋振琪.非均匀非恒定流中泥沙运动规律初探[J].水利学报,1997(6): 2.  
WANG Zhaoyin, SONG Zhenqi. A preliminary study on the movement of sediment in the non uniform unsteady flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997(6): 2.
- [14] 张耀哲.非黏性均匀沙群体沉降运动沉速公式的研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2006,34(4):117.  
ZHANG Yaozhe. Study on theoretic formula of sedimentation velocity in the sediment group settlement zone[J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2006, 34(4):117.
- [15] 封光寅,章厚玉,张孝军,等.泥沙群体颗粒平均粒径及平均沉速计算方法的修正[J].南水北调与水利科技,2003,6(1):36.  
FENG Guangyin, ZHANG Houyu, ZHANG Xiaojun, *et al.* Silt calculation method & formula revision of average particle size and setting velocity[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2003, 6(1):36.
- [16] 费俊祥.泥沙的群体沉降——两种典型情况下非均匀沙沉速计算[J].泥沙研究,1992(3):11.  
FEI Xiangjun. Settling of particle in suspension—Two typical cases in calculating the settling velocity of nonuniform sediment [J]. Journal of Sediment research, 1992(3):11.
- [17] Gu J. Dispersion of unsorted particle cloud in ambient cross flow[D]. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2004.
- [18] Gu Jie, Li Chiwai, Yang Hong, *et al.* Numerical study on the mixing of unsorted sediment particles discharged into a cross-flow by Multiphase Particle-In-Cell (MP-PIC) method [J]. International Journal of Sediment Research, 2007, 22(2):150.
- [19] 苏杭丽,卢永生.粒径计颗粒级配分析的泥沙群团沉降规律[J].河海大学学报,1999, 27(1):34.  
SU Hangli, LU Yongsheng. A theory of silt group settling for particle size analysis by particle size apparatus [J]. Journal of Hohai University, 1999, 27(1): 34.
- [20] Cheng N S. Simplified settling velocity formula for sediment particle[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 132(2): 149.
- [21] 邵学军,王兴奎.河流动力学概论[M].北京:清华大学出版社,2005.  
SHAO Xujun, WANG Xingkui. Introduction of fluvial dynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [22] 顾杰,黄静,李志伟.瞬时排放泥沙颗粒团在横流中对流扩散特性的试验研究[J].水科学进展,2008, 19(4):483.  
GU Jie, HUANG Jing, LI Zhiwei. Experimental study on dispersion of instantaneous discharging sediment cloud in cross-flow[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(4):483.