

Study on Driver Reaction Time Based on Partial Least Squares Regression

Yiqian LU¹, Xichan ZHU¹, Lin LI¹, Lian DUAN², Zhixiong MA¹

¹ Tongji University, Shanghai, China, 201804

² Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden

Email: moon-diana@163.com

Abstract: The influence factors of driver reaction time in critical events were studied in this paper. First of all, the driving behavior data were collected through the driving simulator test. Then, the models of driver reaction time in different test groups were built based on partial least squares regression. Finally, the design of Forward Collision Warning (FCW) system was discussed. The results showed that the model proposed in this paper was effective and could be useful to design the Advanced Driver Assistance Systems (ADAS).

Keywords: driver reaction time; driving simulator; partial least squares regression; Advanced Driver Assistance Systems

基于偏最小二乘回归法的驾驶员反应时间研究

陆依倩¹, 朱西产¹, 李霖¹, 段炼², 马志雄¹

¹ 同济大学, 上海, 中国, 201804

² 查尔姆斯理工大学, 哥德堡, 瑞典

Email: moon-diana@163.com

摘要: 为研究危险工况下驾驶员的反应时间及影响因素, 首先针对前车紧急制动工况进行了驾驶模拟器试验, 并采集了相关驾驶行为数据; 然后利用偏最小二乘回归法(Partial Least Squares Regression, PLSR), 对驾驶员注意力集中和分散两组试验分别建立了驾驶员反应时间模型; 最后, 根据两种情况下得到的驾驶员反应时间影响因素, 对前碰撞预警系统(Forward Collision Warning, FCW)的控制策略开发提出了建议。结果表明, 该方法能够用于建立有效的反应时间模型, 并为先进驾驶辅助系统(Advanced Driver Assistance Systems, ADAS)的开发提供理论依据。

关键词: 驾驶模拟器; 驾驶员反应时间; 偏最小二乘回归法; 先进驾驶辅助系统

1 引言

以先进驾驶辅助系统(Advanced Driver Assistance Systems, ADAS)为代表的主动安全技术已成为当前国内外汽车安全技术的研究热点, 而将驾驶员行为研究与 ADAS 系统开发相结合能更有效地提高汽车安全性, 降低交通事故的发生率^[1]。Zhang, X 和 GH. Bham 等人的研究表明, 驾驶员对危险工况的反应时间在道路设计及交通安全研究方面具有十分重要的意义, 并且其影响因素广泛^{[2][3][4]}。

本文将从统计学角度, 对驾驶员的反应时间及影响因素进行研究, 利用偏最小二乘回归分析(Partial Least Squares Regression, PLSR)算法来进行反应时间的预测。该方法可以有效地消除变量的多重共线性影响, 快速建立反应时间预测模型, 得到各因素对反应时间的影响程度, 并为先进驾驶辅助系统的开发策略提供理论依据。

由于驾驶模拟器具有评价范围宽、评价条件方便控制、工况可重复性好、试验效率高、试验危险性低等优点, 本文中采用驾驶模拟器试验进行数据的采集^[5]。

2 驾驶模拟器搭建

驾驶模拟器分为运动式驾驶模拟器和固定式驾驶模拟器。运动式驾驶模拟器可以向受试者提供实时的车辆运动

学姿态,营造相对真实的车辆动力学环境。本文设计的试验场景不需要驾驶模拟器具有高保真度的车辆运动学特性,因此只搭建了一个简易的固定式驾驶模拟器,如图 1 所示。驾驶模拟器采用游戏赛车座椅,安装在铝型材框架上,座椅可调整,以适用于不同身材的驾驶员,同时在框架上安装方向盘、油门、刹车和离合器踏板;座椅后方的框架上安装有投影仪,可将虚拟场景投影到驾驶员前方的屏幕上,屏幕下有两个音响模拟驾驶舱中的声音及播放前碰撞预警系统(Forward Collision Warning, FCW)的警报声;驾驶员前方的框架上安装了一块透明塑料板,以模拟挡风玻璃,7 个 LED 灯安装在塑料板下方, LCD 屏幕则安装在中控台处;另外还有两个摄像头用于记录驾驶员的操作,一个观察驾驶员视线的变化,另一个观察驾驶员脚踏板操作。整个系统由两台电脑控制,一台用于控制虚拟场景,另一台用于控制 FCW 信号输出和记录驾驶员操作信息,两台电脑之间通过串口线相连接。



Figure 1. The static driving simulator
图 1. 固定式驾驶模拟器

3 试验场景及流程设计

本文采用 STISIM 软件的“场景定义语言 (scenario definition language, SDL)”编写虚拟交通场景,主要包含 4 段危险场景,若干普通场景及“假”危险场景。

本文中设计的交通场景为双向四车道,如图 2 所示^[6]。车辆限速在 100km/h 以下,车流量为中等水平。

3.1 危险场景设计

本文采用了前车紧急制动工况来建立危险场景,试验过程中要求驾驶员尽量行驶在右侧车道,保持车速在 90km/h 左右。当本车达到稳定车速 v_1 时,左侧车道上原本在本车后方的目标车以车速 v_2 超过本车,当与本车纵向距离达到 $d_{\text{cut-in}} = \text{THW}_{\text{cut-in}} \times v_1$ 时切入本车车道,2s 内完成切入,并保持车速 v_2 前进。当两车纵向距离达到 d_{brake} 时,将目标车车速设置为 $0.8 \times v_1$,然后目标车开始减速,在 1s 内完成。此时,若本车仍在目标车后方,则将目标车车速设置为 v_3 ,在 3.3436 秒内以恒定减速度制动,直至消失在驾驶员视野中,否则目标车以加速度 a_c 加速到 v_4 ,直至消失在驾驶员视野中。如果两车发生碰撞,通过扬声器模拟风挡玻璃破碎的声音,同时虚拟交通场景变成破碎的风挡玻璃图案,1.5s 后,车辆重新置于右侧车道中心,驾驶员操作车辆从静止起步,重新开始测试。以上各参数的定义及参数值设定见表 1 所示。

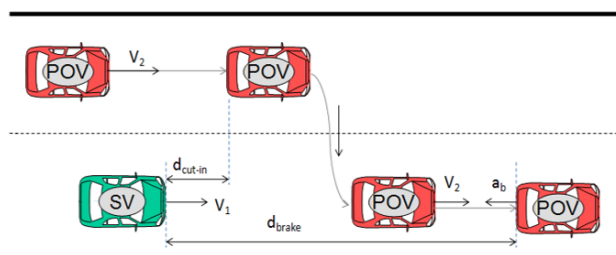


Figure 2. Simulation of event
图 2. 模拟场景示意图

Table 1. Parameters of the event
表 1. 危险场景设置参数

参数名	参数含义	参数值
v_1	本车车速	驾驶员设定, 低于 100km/h
v_2	目标车车速	与本车车速成正比例关系, 即 $v_2 = R_x \times v_1$
R_x	比例系数	1.15
THW_{cut-in}	目标车开始切入时刻两车之间的时距	0.9s
d_{brake}	目标车开始制动时车距	42.5m
a_c	目标车加速度	0.3g
v_3	目标车制动最低车速	25 km/h
v_4	目标车加速最高车速	140 km/h

3.2 干扰场景设计

在测试过程中, 为了避免驾驶员对危险工况有预期心理, 在危险场景出现之前及各个危险场景之间, 设置了若干段“假”危险场景作为干扰场景, 这些场景与危险场景的设置大致相同, 只是当两车距离达到 d_{brake} 时, 目标车并不制动, 而是加速驶远, 消失在驾驶员的视野中。

3.3 干扰任务设计

在测试过程中, 系统会发出声音提示驾驶员开始读数, 然后 LCD 屏幕上随机显示五个数字 (0-9 的整数), 每个数字显示时间为 0.3s, 中间间隔 0.2s, 共持续 2.3s。为保证干扰效果, 试验开始前会告知受试者, 本次试验需要统计他们正确读数的个数来评价他们的驾驶行为表现。在普通场景 (模拟一般的交通环境, 其他车辆不与本车产生冲突) 及干扰场景中, 读数开始时刻并没有要求, 但在危险场景中, 读数开始时刻必须在目标车完成切入之后、开始制动之前。

3.4 试验流程

本文中设计了两组对照试验, 每组试验中驾驶员都会遇到上文提出的危险场景、普通场景及干扰场景, 两组试验的区别在于, 一组试验中驾驶员还需完成上文中设置的干扰任务, 另一组则不需要。试验过程中, 当本车与前车的 TTC(Time-to-collision)值小于阈值时, FCW 通过声音和视觉两方面向驾驶员提出警示, 扬声器发出“嘟嘟嘟”的警报声, 同时, 7 个 LED 灯亮起。

本次试验参与者共 32 人, 所有受试者均非职业驾驶员, 驾龄范围分布较广。测试开始前, 先向受试者介绍试验流程以及注意事项, 让驾驶员填写基本信息问卷, 同时, 告知驾驶员试验目的是评价驾驶模拟器的性能, 但并不告知任何有关碰撞预警的信息。

完成试验介绍和基本信息填写后, 让受试者在驾驶模拟器上试驾一段时间, 以熟悉试验环境, 整个过程中只涉及普通场景, 试驾结束后让受试者填写调查问卷, 对模拟器及试验环境进行主观评价, 同时提出改进意见。

待受试者做好准备后开始正式试验, 每名受试者先后完成无干扰与有干扰两组试验, 每组试验结束后分别填写一份调查问卷, 了解受试者对预警系统的主观感受, 作为对客观数据的补充。

4 数据分析与讨论

4.1 变量定义

除了驾驶员基本信息, 以及车辆位置、车速、加速度等数据外, 本文主要提取的变量如图 3 所示。从前车开始制动到 FCW 警报触发的时间定义为 FCW 触发时间 (T_{fcw}); 从前车制动到驾驶员开始踩下制动踏板或转动方向盘

的时间定义为制动反应时间（BRT）和转向反应时间（SRT），两者中较小的值作为驾驶员反应时间（RT），驾驶员开始反应时刻的 TTC 值定义为反应时刻 TTC（ TTC_R ）。

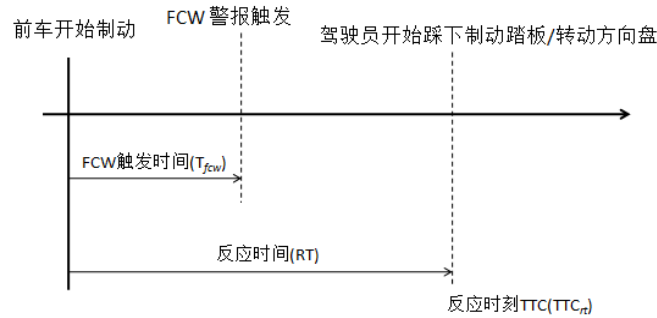


Figure 3. Summary of variables
图 3. 变量定义

4.2 反应时间预处理

以无干扰任务组的驾驶员反应时间为例，在试验中，每名受试者会先后遇到 4 例前车紧急制动的危险场景，共计 128 例。其中，由于驾驶员过于谨慎，在前车并未开始制动时已采取措施，或两车距离始终保持在安全阈值内，并未触发 FCW 的事件有 8 例，因此有效场景共计 120 例。为比较不同危险场景下驾驶员反应时间的差异，以反应时间为观测变量，危险场景为控制变量，利用 SPSS 进行单因素方差分析^[7]。

从表 2 单因素方差分析输出可以看出，在 $\alpha=0.05$ 显著水平下，各组反应时间之间存在显著差异。进一步对四个场景进行两两比较，在 $\alpha=0.05$ （95%置信区间）下，表 3 多重结果比较反映，场景 2、3、4 之间反应时间并无显著差异，但均与场景 1 中的反应时间有显著差异。原因是经过第一次危险场景后，驾驶员有了一定的警惕性，反应时间随之变短，但经过第 2、3 次危险场景后，驾驶员对危险工况处理有了一定经验，反应时间会稍有变长，但变化并不显著，这也与真实情况相符。因此，为了较为真实的反映驾驶员在遇到前车紧急制动工况时的反应时间，下文均采用场景 1 的数据进行分析。

Table2. The one-way ANOVA results of reaction time as dependent variable
表 2. 反应时间单因素方差分析结果

	平方和	df	均方	F	显著性
组间	3.411	3	1.137	2.770	.045
组内	47.628	116	.411		
总数	51.040	119			

Table 3. Multiple comparison of reaction times of four events
表 3. 反应时间多重比较

(I) 场景	(J) 场景	均值差 (I-J)	标准误差	显著性
1	2	.3493860*	.1641068	.035
	3	.4408676*	.1655385	.009
	4	.3338527*	.1641068	.044
2	1	-.3493860*	.1641068	.035
	3	.0914816	.1668667	.585
	4	-.0155333	.1654465	.925
3	1	-.4408676*	.1655385	.009
	2	-.0914816	.1668667	.585

	4	-.1070149	.1668667	.523
4	1	-.3338527*	.1641068	.044
	2	.0155333	.1654465	.925
	3	.1070149	.1668667	.523

4.3 偏最小二乘回归法

本文中采用偏最小二乘回归法来进行反应时间的分析预测。偏最小二乘回归法是一种有广泛适用性的多元统计分析方法，它于 1983 年由 S.Wold 和 C.Albano 等人首次提出并成功地应用在化学领域，目前在机器学习、文本分类等领域也有了广泛应用。偏最小二乘回归方法主要是在自变量的集合中提取若干对系统具有最佳解释能力的综合变量（即成分），对它们进行回归建模，这一方法集主成分分析、典型相关分析和线性回归分析的特点于一体，可以建立更为合理的回归模型。它的运算过程简单描述如下^[8]：

设有自变量矩阵 $X=[x_1, x_2, \dots, x_p]_{n \times p}$ 和因变量 $Y=[y_1, y_2, \dots, y_q]_{n \times q}$ ，首先分别从 X 、 Y 中提取出第一成分 u_1 、 v_1 （ u_1 是 $x_1, \dots, x_p$ 的线性组合， v_1 是 $y_1, \dots, y_q$ 的线性组合）。在提取成分时需要满足两个条件：

1) u_1 、 v_1 应尽可能大地携带它们各自数据表中的变异信息；

2) u_1 、 v_1 相关程度尽可能大；

也就是说，自变量成分 u_1 ，因变量成分 v_1 在尽可能准确地代表 X 和 Y 数据的同时， u_1 对 v_1 有很强的解释能力。

然后分别实施 X 对 u_1 ， Y 对 u_1 的回归，如果回归方程达到满意的精度，则算法终止，否则，将 X 被 u_1 解释后的残余信息 X_1 ， Y 被 u_1 解释后的残余信息 Y_1 ，分别作为 X 、 Y 进行第二成分的提取，直至模型达到满意精度。若最终对自变量 X 集提取了 r 个成分， $u_1, \dots, u_r$ ，实施 Y 对 $u_1, \dots, u_r$ 回归，即为偏最小二乘回归方程式。

4.4 反应时间偏最小二乘回归模型建立

选取 FCW 触发时间、反应时刻 TTC、性别、年龄、驾龄、纵向加速度、横向加速度、纵向速度、横向速度等 9 个因素作为自变量，记作 $x=(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9)$ ；因变量为反应时间，记作 y 。建立 y 对 $x_1 \sim x_9$ 的回归方程，以确定 9 个因素对反应时间的影响。

由于各变量的量纲及数量级均不同，为了进行比较，首先需要对样本数据进行标准化处理，一般采用 Z 标准化，标准化后的变量分别记作 X_0 、 Y_0 。

求出矩阵 $X_0^T Y_0 Y_0^T X_0$ 的最大特征值对应的特征矢量 w_1 ，根据公式（1）可以求得成分 u_1

$$u_1 = X_0 w_1 \quad (1)$$

记残差矩阵 $X_1 = X_0 - u_1 P_1^T$ ，其中 $P_1^T = X_0^T u_1 / \|u_1\|^2$ ， P_1 为 X_0 对 u_1 的回归系数。用 X_1 替代 X_0 ，同理，可以求出第二成分 $u_2 = X_1 w_2$ 。

以此类推，直至第 r 步，求得成分 u_r ，若可以得到一个满意的模型，则成分提取至第 r 步结束，并可求 Y_0 对 $u_1, \dots, u_r$ 上的回归方程

$$Y_0 = u_1 R_1^T + \dots + u_r R_r^T + Y_r \quad (2)$$

其中， $R_1, \dots, R_r$ 为 Y_0 对 $u_1, \dots, u_r$ 的回归系数， Y_r 为残差矩阵。由于 $u_1, \dots, u_r$ 均可以表示成 X_0 的线性组合，因此 Y_0 最终可以表达为关于 X_0 的偏最小回归方程式，再将标准化数据还原为原始数据，即得到最终的回归模型，如公式（3）所示

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \dots + \alpha_9 x_9 \quad (3)$$

其中， α_0 为常数项， $\alpha_1, \dots, \alpha_9$ 为回归方程系数。

提取的成分个数 r 可以通过交叉有效性检验来确定。每次舍去第 i 个观测数据（ $i=1, 2, \dots, n$ ），对余下的 $n-1$ 个观测数据用偏最小二乘回归方法建模，并考虑抽取 h （ $h \leq r$ ）个成分后拟合的回归方程，把舍去的第 i 个观测数据带入所拟合的回归方程式，得到 Y_0 在第 i 个观测值上的预测值。对 $i=1, 2, \dots, n$ 重复上述预测值计算后，最终可以得到抽取 h 个成分后， Y_0 的预测误差平方和 $PRESS(h)$ 。另外，用所有的样本点，拟合含 h 个成分的回归方程，得到 Y_0 的误差平方和 $SS(h)$ 。由于当 $PRESS(h)$ 达到最小值时，对应的 h 即为所求的成分个数，通常 $PRESS(h)$ 大于 $SS(h)$ ，而 $SS(h)$ 则小于 $SS(h-1)$ ，因此，在提取成分时，总希望比值 $PRESS(h)/SS(h-1)$ 越小越好，一般设定限制值为 0.05，即当 $PRESS(h)/SS(h-1) \leq (1-0.05)^2$ 时，增加成分有利于模型精度的提高。定义交叉有效性为

$Q_h^2=1-\text{PRESS}(h)/\text{SS}(h-1)$, $Q_h^2<1-0.9025=0.0975$, 则模型达到精度要求。

4.5 分析与对比

在无干扰组中, 有 4 人过于谨慎, 危险场景未触发, 另有 1 人数据异常, 故有效样本量为 27 个。计算表明只需提出 3 个成分即可, 此时, 交叉有效性 $Q_h^2=-0.4751$, 最终回归模型为:

$$y=5.334+0.0511x_1-0.4156x_2+0.0212x_3+0.0028x_4+0.0117x_5+0.1089x_6+0.5785x_7-0.1677x_8+0.04x_9 \quad (4)$$

在有干扰组(驾驶任务中驾驶员有读数任务)中, 有 1 人过于谨慎, 危险场景未触发, 另有 3 人未做出反应即导致事故发生, 故有效样本量为 28 个。计算表明只需提出 2 个成分即可, 此时, 交叉有效性 $Q_h^2=-0.4704$, 最终回归模型为:

$$y=3.9890+0.4282x_1-0.5927x_2-0.1300x_3-0.0004x_4-0.0215x_5+0.0002x_6+0.0003x_7+9.5424e-05x_8-0.0007x_9 \quad (5)$$

为了更直观、迅速地观察各个自变量在解释反应时间时的作用, 及两组试验的对比, 分别对两个模型绘制回归系数直方图, 如图 4 所示,

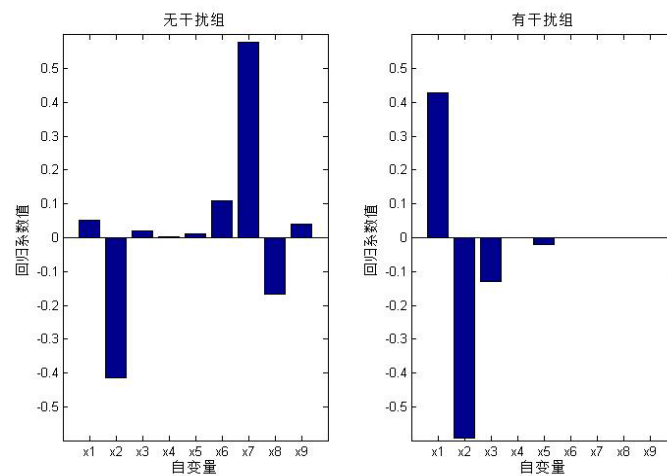


Figure 4. The histogram of regression coefficient

图 4. 回归系数直方图

从回归系数直方图中可以直观地观察到, 在无干扰组中 TTC 值(x_2)、横向加速度(x_7)和纵向车速(x_8)是影响反应时间的重要因素。当车速越高, TTC 值越小时, 驾驶员对危险工况的反应时间就越长, 因此控制车速, 保持与前车车距, 当遇到危险工况时, 驾驶员能够迅速地做出合理的判断, 避免碰撞事故的发生。

在有干扰组中影响驾驶员反应时间的主要因素为 FCW 触发时间(x_1)和 TTC 值(x_2), 与无干扰任务组的区别在于, 当驾驶过程中有干扰时(即驾驶员注意力分散), FCW 的触发时间对驾驶员反应时间起到了显著的影响作用, 若 FCW 触发时间越早, 驾驶员能越早发现碰撞风险的存在, 反应时间就越短, 可以及时地采取措施避免事故发生。这一情况也可从两组试验的碰撞概率中看出, 当驾驶员被次要任务干扰, 注意力分散时, 发生碰撞的概率达到了 60.1%, 远远大于无干扰任务组的碰撞概率 14.3%。

从上述分析过程中可得知, FCW 越早对驾驶员发出警报, 驾驶员的反应时间就越短, 能更好地避免碰撞事故, 然而, FCW 警报过早又容易干扰驾驶员正常驾驶, 影响驾驶体验, 甚至降低驾驶员对系统的信任度, 结果适得其反。因此, 在进行 FCW 设计时, 应对驾驶员的状态进行探测识别, 分别针对驾驶员注意力集中和分散两种情况设计 FCW 触发时间, 保证 FCW 在不干扰驾驶员驾驶体验的同时, 提高预警作用, 避免事故的发生。

5 结论

本文采用偏最小二乘回归法对前车紧急制动工况建立了驾驶员反应时间模型，并得到了影响反应时间的重要因素，结果与现实情况相符，表明该方法用于反应时间建模是有效的。最后，利用模型结果，以FCW的触发时间为例提出了设计建议。

但论文仍存在不足和有待改进的地方：1) 本文中样本数据来自驾驶模拟器试验，与真实驾驶数据相比存在一定误差，可对驾驶模拟器作进一步的改进，令驾驶员的驾驶体验与真实环境尽可能接近，从而得到更为准确的驾驶行为数据，或是采用实车路试进行数据采集。2) 本文中仅设计了前车紧急制动的场景，还可以针对不同的先进驾驶辅助系统，设计不同的危险场景进行建模。3) 利用反应时间模型提出的控制策略还需在实车上进行验证。

参考文献 (References)

- [1] Ma X., and I. Andréasson. *Driver reaction time estimation from real car following data and application in GM-type model evaluation*. in *Proceedings of Trb Annual Meeting*. 2006.
- [2] Zhang X., and GH, Bham. *Estimation of driver reaction time from detailed vehicle trajectory data*. Moas. 2007, pp.574-579.
- [3] Olson, P., *Driver Perception Response Time*. SAE Technical Paper 890731, 1989.
- [4] Sens, M., Cheng, P., Wiechel, J., and Guenther, D., *Perception/Reaction Time Values for Accident Reconstruction*, SAE Technical Paper 890732, 1989.
- [5] A. Auckland R, J. Manning W, M.J. Carsten and A. H. Jamson O. *Advanced driver assistance systems: Objective and subjective performance evaluation*. *Vehicle System Dynamics International Journal of Vehicle Mechanics & Mobility* volume 46.10, 2009, pp.883-897.
- [6] Aust ML, Engström J, Viström M. *Effects of forward collision warning and repeated event exposure on emergency braking*. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*. 2013,18:34-46.
- [7] Wu, S, and Pan, FM. *SPSS Statistical Analysis*. [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014
(武松, 潘发明. SPSS 统计分析大全. 清华大学出版社, 2014)
- [8] Wang, HW. *Partial least squares regression method and its application*. National Defence Industry Press, 1991
(王惠文. 偏最小二乘回归方法及其应用. 国防工业出版社, 1999)