

驾驶模拟器运动系统对自由驾驶行为的影响分析

涂辉招, 李振飞, 孙立军

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 通过构建晴、雾天气下自由驾驶两个实验场景, 对比分析了 8 自由度和零自由度驾驶模拟器对自由驾驶加减速行为、期望速度等变量的影响。结果发现, 当能见度相同时, 驾驶模拟器运动系统自由度对加速行为和期望速度影响不显著, 但对减速行为影响显著, 特别是对浓雾天气下的减速行为影响显著; 当驾驶模拟器运动系统自由度相同时, 能见度对驾驶员的加减速行为和期望速度有显著影响。

关键词: 驾驶模拟器; 自由度; 加速行为; 减速行为; 期望速度

中图分类号: U491.1

文献标志码: A

Effects of Motion System of Driving Simulator on Free Driving Behaviors

TU Huizhao, LI Zhenfei, SUN Lijun

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

Abstract: The degree of freedom (DOF) of the motion system does influence driving behavior. This paper established two free driving scenarios under clear weather and foggy weather to investigate the impacts of 8 DOF and fixed-based driving simulator on the driving behaviors of acceleration, deceleration and desired speed. The results show that the DOF of driving simulator has less impacts on the acceleration behavior and desired speed, yet it has significant impacts on the deceleration behavior, especially at foggy weather conditions. The visibility of weather conditions has significant impacts on the driving behaviors.

Key words: driving simulator; degree of freedom (DOF); acceleration behavior; deceleration behavior; desired speed

驾驶模拟器利用图像、音响以及汽车操控系统的反力感受营造虚拟的驾驶环境。由于驾驶模拟器

可以模拟各类道路环境和设置交通流, 且安全性和可控性较好, 逐渐成为研究危险情况下驾驶行为(低能见度^[1-3]、紧急疏散^[4]、疲劳驾驶^[5-7]、手机通话^[8]、紧急避撞^[9-10]、服用药物^[11-12]等)的重要手段。

不少学者开展了驾驶模拟器的有效性研究。Jamson^[13]定义了驾驶模拟器的物理有效性, 即驾驶模拟器的运动系统、图像系统能在多大程度上模拟真实的驾驶环境, 使驾驶员做出符合实际情况的反应。Blana^[14]提出驾驶模拟器能否模拟真实情况取决于其图像系统(广角、逼真、高刷新频率)、运动系统(纵横向运动、加速、刹车、反应路面颠簸)、操控系统(反力感受)、声音系统(车辆声音、环境声音)、驾驶室环境与真实驾驶时的相似程度。

开展运动系统对驾驶行为的影响研究主要分为两类: 第一类是当同时存在横向受力和纵向受力时运动系统对于驾驶行为的影响, 例如横风、转弯、沿曲线行驶等情况; 第二类是仅有纵向受力时运动系统对于驾驶行为的影响, 例如平稳行驶、加速、减速等情况。

对于第一类研究, Repa 等^[15]设置了 3 种工况: 运动系统关闭, 横向运动系统部分开启(横向平移、横向倾斜), 横向运动系统全部开启(横向平移、横向倾斜、延横向轨道加速), 研究突发的横风对于车辆的横向位置和车头方向的影响。结果表明随着横向运动系统自由度的升高, 驾驶员对车辆的操控更加稳定, 同时发现横向运动系统自由度对车头方向的影响比横向位置的影响更大。Siegler 等^[16]设置了 4 种工况: 运动系统关闭, 横向运动系统开启(横向平移、横向倾斜、转动), 纵向运动系统开启(纵向平移、前后摆动), 纵横向运动系统同时开启, 研究车辆进行 90°转弯时运动系统对驾驶行为的影响。结果表明当横向运动系统开启或纵横向运动系统同时开启时, 车辆的转弯轨迹基本重合, 离路缘较远, 同时线

收稿日期: 2014-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(71271155)

第一作者: 涂辉招(1977—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路交通风险评估, 应急管理, 交通行为分析, 交通规划, E-mail: huizhaotu@tongji.edu.cn

速度和角速度较低;当运动系统关闭或仅开启纵向运动系统时,车辆的转弯轨迹基本重合,离路缘较近,线速度和角速度较高.由此表明横向运动系统对转弯时驾驶员的线速度和横向加速度有较大的影响,纵向运动系统影响不明显.Reymond 等^[17]设置了 3 种工况:运动系统关闭,运动系统开启,实车驾驶,研究驾驶员转弯时横向加速度与线速度之间的关系.结果表明当运动系统关闭时,横向加速度随线速度增加下降的速率最慢,且转弯时最大线速度最高;运动系统开启时得到的数据更加接近实车驾驶情况,并认为较高的运动系统自由度可以给驾驶员提供更多的“动态线索”让驾驶员判断自己的线速度和横向加速度.Greenberg 等^[18]让驾驶员沿设定的曲线行驶,同时伴有电话、收音机、横风等干扰,通过开启或关闭横向运动系统,测量车身的横向偏移以及车头方向与曲线切线的夹角,研究发现横向运动系统有助于驾驶员更加精确地操控车辆,减少操控误差.综上,当驾驶环境中存在横向受力时(横风、转弯、沿曲线行驶),较高自由度的运动系统可以让驾驶员采用更加合理的横向加速度和线速度,同时也有助于驾驶员保持车身位置和车头方向.

对于第二类研究,Panerai 等^[19]发现当驾驶员在执行跟驰任务时,有无运动系统对于速度影响不大.Siegler 等^[16]研究了运动系统对于刹车行为的影响,每个实验者需要完成 16 次刹车实验,8 次运动系统开启,8 次运动系统关闭.结果表明运动系统使驾驶员避免采用过高的减速度进行刹车;同时研究还发现,在运动系统关闭的 8 次实验中,减速度逐次增加,当运动系统开启时,8 次刹车实验的减速度保持稳定.Colombet 等^[20]研究运动系统对于跟驰速度、加减速度的影响,在实验中驾驶员被要求与前车保持 15 m 的距离,前车速度将在 $[0, 80] \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 范围内呈现阶梯状变化.结果表明运动系统对于平均速度的影响不显著.通过统计前车速度升高/下降时后车采用的最大加/减速表明运动系统开启和关闭对最大加/减速有数值上的影响,但变化趋势并不统一,但并没有就影响是否显著进行进一步的分析.综上,当驾驶环境中仅存在纵向受力时,运动系统对刹车行为有显著影响,对跟驰状态下速度影响不够显著,而对于跟驰状态下的加减速的影响趋势还需要进一步研究.

随着驾驶模拟技术的发展,不同气候下的驾驶行为分析越来越多地利用驾驶模拟器开展,但少有对比分析场景对驾驶行为的影响的研究.本文将利

用同济大学 8 自由度驾驶模拟器,通过开启或关闭其运动系统,使其成为 8 自由度和零自由度固定底座驾驶模拟器,并构建晴雾天气下自动驾驶两个场景,以运动系统自由度和能见度为控制变量,研究其对驾驶员加减速行为、期望速度的影响.

1 研究方法

1.1 实验场景

根据《雾的等级划分标准》,晴天的能见度为大于 10 km,浓雾的能见度范围为 50~200 m,本文取 80 m.本研究构建了晴天和浓雾下自动驾驶场景,设置了两种自由度的驾驶模拟器:8 自由度驾驶模拟器和零自由度固定底座驾驶模拟器.根据驾驶场景和驾驶模拟器种类,共设置 4 种实验场景,见表 1.

表 1 实验场景

Tab.1 Scenarios

能见度划分	实验场景代号	
	8 自由度	零自由度
晴天(>10 km)	FCD	FCS
浓雾(80 m)	FHD	FHS

注:实验场景代码由 3 个字母组成;F(free driving)为自动驾驶场景;C(clear)为晴天;H(haze)为能见度为 80 m 的浓雾;D(dynamic)为 8 自由度驾驶模拟器;S(static)为固定底座驾驶模拟器.

2.2 实验样本

21 名男性驾驶员参与了本次实验,他们都拥有合格的驾驶证,有 1 名驾驶员产生头晕的现象,其他 20 名驾驶员对驾驶模拟器的适用性良好.表 2 是实验样本的详细信息.

表 2 实验样本

Tab.2 Detailed information of participants

参数	年龄/岁	驾驶年限/岁
平均值	39.8	9.4
范围	36.0~44.0	6.0~13.0
标准差	3.0	3.3

2.3 驾驶模拟器

实验使用同济大学高逼真度的驾驶模拟器(见图 1).该模拟器的驾驶模拟舱中放置了一辆完全真实的车辆,该车设置了真实的力反馈系统,包括方向盘、油门、刹车.车辆前方是一个 250°的环形屏幕,刷新频率是 60 Hz.通过 SCANeRTM软件来控制整个驾驶模拟器.驾驶模拟器有 8 自由度的运动系统,此运动系统可以开启和关闭.

当驾驶模拟器的运动系统开启时,驾驶模拟器沿 x, y, z 方向微量平移及以 x, y, z 为轴微量转动,同时可以在 5 m×20 m 上的钢轨上自由移动,此时为 8 自由度驾驶模拟器.驾驶员可以感受到方向盘、

油门、刹车的力反馈. 当驾驶模拟器的运动系统关闭时, 驾驶模拟器整体不会发生任何平移或者转动, 驾驶员仅感受到方向盘、油门、刹车的力反馈, 此时为固定底座驾驶模拟器.

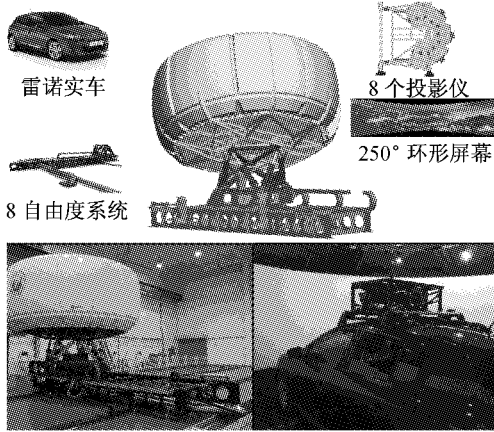


图 1 同济大学高逼真度驾驶模拟器^[9]
Fig.1 High fidelity driving simulator in Tongji University^[9]

2.4 实验步骤

2.4.1 预实验

每位驾驶员被告知应遵守的操作规范, 并熟悉驾驶模拟器. 每位驾驶员在晴天下的一条高速公路上自由驾驶 5 min, 在此过程中, 驾驶员将经历加速、减速、平稳行驶的过程, 同时驾驶员也将熟悉踩踏油门和刹车板的动作, 并观察驾驶员是否有不适反应. 若驾驶员一切正常, 休息 5 min 后开始正式实验.

2.4.2 自由驾驶场景实验方案

驾驶员将在双向 4 车道限速 120 km · h⁻¹ 的高速公路上经历启动加速、平稳行驶、减速停车 3 个连续过程.

启动加速: 驾驶员从静止状态以安全舒适的加速度启动加速.

平稳行驶: 当驾驶员的速度保持在较高水平(晴天时大于 100 km · h⁻¹, 浓雾天气下大于 50 km · h⁻¹)并保持一段时间, 且出现小幅震荡, 可以认为驾驶员已经到达期望速度, 保持 20 s.

减速停车: 告知驾驶员以安全舒适的减速度减速直至停车.

2.5 数据采集

本文驾驶行为变量包括期望速度、驾驶员愿意采用的最大加减速度、平均加减速度、最大油门和刹车板受力、平均油门和刹车板受力. 表 3 是本实验研究的驾驶行为变量.

表 3 驾驶行为变量

Tab.3 Variables of driving behavior		
变量	符号	定义
期望速度	v_0	自由流情况下, 在保证舒适和安全前提下, 驾驶员希望达到的速度
最大加速度	a_{max}	启动过程中驾驶员愿意采用的最大加速度
平均加速度	\bar{a}	启动过程中, 驾驶员采用的平均加速度
最大油门受力	$F_{a_{max}}$	启动过程中, 油门开度的最大值
平均油门受力	\bar{F}_a	启动过程中, 油门开度的平均值
最大减速度	b_{max}	减速刹车过程中, 驾驶员愿意采用的最大减速度
平均减速度	\bar{b}	减速刹车过程中, 驾驶员采用的平均减速度
最大刹车板受力	$F_{b_{max}}$	减速刹车过程中, 驾驶员对刹车板施加的最大力
平均刹车板受力	\bar{F}_b	减速刹车过程中, 驾驶员对刹车板施加的平均力

驾驶员在自由驾驶场景中, 将经历启动加速、平稳行驶、减速刹车 3 个行驶阶段. 驾驶模拟器将以 10 Hz 的频率进行数据采集. 图 2 为自由驾驶场景各变

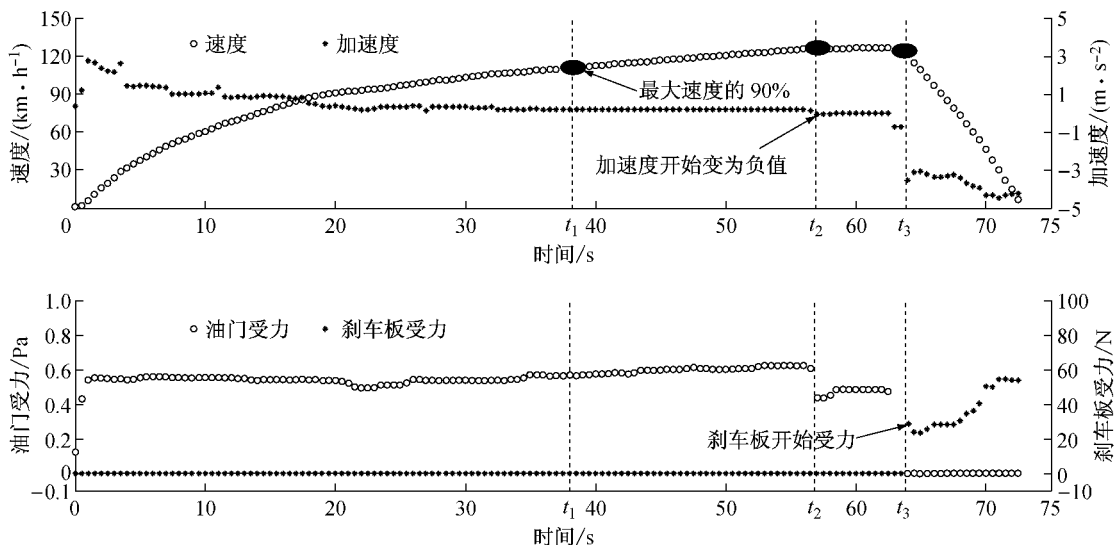


图 2 自由驾驶场景各变量随时间的变化
Fig.2 Variables in free driving scenarios

量随时间的变化.

2.5.1 期望速度

在自由流状态下,驾驶员不受道路情况和其他车辆影响,在保证安全舒适情况下采用的最大速度可以认为是驾驶员的期望速度 v_0 . 驾驶员将根据道路等级、道路情况以及限速情况来选择期望速度. 在本研究中,驾驶员将经过启动加速阶段到达平稳行驶阶段,驾驶员此时的驾驶速度较高,同时加速度的绝对值较小,可以认为驾驶员已经达到期望速度.

从图 2 可以看出,在 t_2 时刻,加速度出现小于 0 的数值,可认为在 t_2 时刻的速度已处于较高水平,驾驶人员可以适当降低速度或者维持此时的速度. 因此在 t_2 到 t_3 时间内驾驶员处于平稳行驶阶段(这并不表示在 t_2 时刻之前没有平稳行驶阶段). 驾驶模拟器将以 10 Hz 的频率对 t_2 到 t_3 时刻的速度 v_i 进行取样,计算其平均值作为期望速度 v_0 .

2.5.2 最大加速度、平均加速度、最大油门受力和平均油门受力

a_{\max} , \bar{a} , $F_{a_{\max}}$ 和 \bar{F}_a 的获取是在启动加速阶段. 从图 2 可以看出,当速度较低时,加速度较大,当行驶速度较高时,加速度往往数值很小,速度缓慢上升,此时由于驾驶员无法精确控制油门,为了不使速度下降,往往用较大的力施加在油门上,呈现出较小数值的加速度,这一阶段并不能完全被认为是启动加速阶段. 同时,不同驾驶员经历此阶段的时间长短不一,这对平均加速度的取值产生了很大的影响.

为了确定统一标准,取驾驶员从 $0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 加速到最大速度的 90% 为启动加速阶段,在图 2 中为 0 到 t_1 时刻. 驾驶模拟器将以 10 Hz 的频率进行取样,此过程中的加速度的最大数值即为最大加速度 a_{\max} . 用速度的变化值除以时间获得平均加速度 \bar{a} . 油门受力的最大的数值即为最大油门受力 $F_{a_{\max}}$. 每 0.1 s 的油门受力的平均值为平均油门受力 \bar{F}_a .

2.5.3 最大减速度、平均减速度、最大刹车板受力和平均刹车板受力

从图 2 可以看出,在 t_3 时刻,刹车板受力从 0 N 增加到较高数值,加速度突变,速度开始快速下降, t_3 时刻驾驶员开刹车减速. 从 t_3 时刻到最后,刹车板始终受力,速度减小到 $0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,此阶段为减速刹车阶段. 驾驶模拟器将以 10 Hz 的频率进行取样,其中减速度最大数值即为最大减速度 b_{\max} . 用速度的变化值除以时间获得平均减速度 \bar{b} . 刹车板受力的最大数值即为最大刹车板受力 $F_{b_{\max}}$. 每 0.1 s 的刹车板受力的平均值为平均刹车板受力 \bar{F}_b .

3 实验结果与分析

3.1 加速行为变量

图 3 给出了 4 种实验场景下最大加速度和平均加速度的平均值及标准差. 图 4 给出了 4 种实验场景下最大油门受力和平均油门受力的平均值及标准差. 表 4 则比较了不同实验场景下各驾驶行为变量的相对差异.

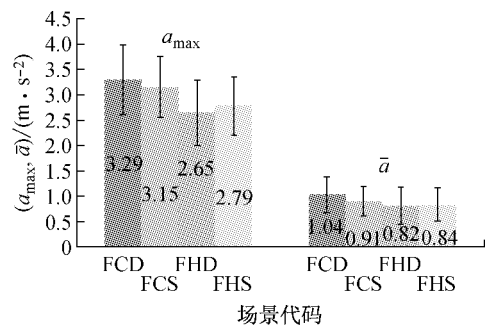


图 3 自由驾驶场景下的最大加速度和平均加速度

Fig.3 a_{\max} and \bar{a} in free driving scenarios

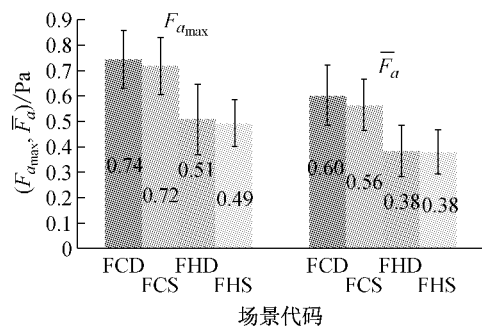


图 4 自由驾驶场景下的最大油门受力和平均油门受力

Fig.4 $F_{a_{\max}}$ and \bar{F}_a in free driving scenarios

从图 3、图 4 和表 4 可以看出,晴天时,固定底座驾驶模拟器(FCS)获得的 a_{\max} 平均值、 \bar{a} 平均值、 $F_{a_{\max}}$ 平均值和 \bar{F}_a 的平均值分别比 8 自由度驾驶模拟器(FCD)低 4%, 12%, 3% 和 7%; a_{\max} 标准差、 \bar{a} 标准差和 \bar{F}_a 标准差分别降低 12%, 20% 和 10%, 而 $F_{a_{\max}}$ 标准差则不变. 雾天时,固定底座驾驶模拟器(FCS)获得的 a_{\max} 平均值、 \bar{a} 平均值分别比 8 自由度驾驶模拟器(FCD)高 5%, 2%, $F_{a_{\max}}$ 平均值比 8 自由度驾驶模拟器低 4%, 而 \bar{F}_a 的平均值不变; a_{\max} 标准差, \bar{a} 标准差, $F_{a_{\max}}$ 标准差和 \bar{F}_a 的标准差分别降低 10%, 11%, 35% 和 10%.

表 5 总结了运动系统和能见度对驾驶行为变量

表 4 运动系统和能见度对驾驶行为变量的影响

Tab.4 Relative differences of variable values caused by driving simulator fidelities and visibility

参数	$(\frac{FCD-FCS}{FCD})/\%$		$(\frac{FHD-FHS}{FHD})/\%$		$(\frac{FCD-FHD}{FCD})/\%$		$(\frac{FCS-FHS}{FCS})/\%$	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
a_{max}	4	12	-5	10	20	6	11	4
\bar{a}	13	20	-2	11	22	-4	8	-16
$F_{a_{max}}$	3	0	4	35	32	-21	31	18
\bar{F}_a	7	17	0	10	36	14	33	15
b_{max}	-12	-32	-8	-56	17	45	20	37
\bar{b}	-7	-95	-22	-23	24	2	13	38
$F_{b_{max}}$	-36	-24	-20	-86	22	47	25	25
\bar{F}_b	-23	-56	-32	-26	25	6	19	24
v_0	5	-14	11	0	35	9	40	14

表 5 运动系统和能见度对驾驶行为变量影响显著性分析(独立样本 t 检验($\alpha=10\%$))

Tab.5 Significance test for behavioral variables (Independent sample t test ($\alpha=10\%$))

参数	FCD 相对 FCS	FHD 相对 FHS	FCD 相对 FHD	FCS 相对 FHS
a_{max}	不显著 (sig=0.504)	不显著 (sig=0.449)	显著 (sig=0.034)	显著 (sig=0.055)
\bar{a}	不显著 (sig=0.492)	不显著 (sig=0.774)	显著 (sig=0.064)	不显著 (sig=0.628)
$F_{a_{max}}$	不显著 (sig=0.490)	不显著 (sig=0.761)	显著 (sig=0)	显著 (sig=0)
\bar{F}_a	不显著 (sig=0.207)	不显著 (sig=0.987)	显著 (sig=0.060)	不显著 (sig=0.284)
b_{max}	不显著 (sig=0.131)	显著 (sig=0.057)	显著 (sig=0.004)	显著 (sig=0.009)
\bar{b}	不显著 (sig=0.263)	显著 (sig=0.016)	显著 (sig=0.001)	不显著 (sig=0.146)
$F_{b_{max}}$	显著 (sig=0.091)	显著 (sig=0.070)	显著 (sig=0.019)	显著 (sig=0.009)
\bar{F}_b	显著 (sig=0.069)	显著 (sig=0.029)	显著 (sig=0.043)	显著 (sig=0.079)
v_0	不显著 (sig=0.134)	不显著 (sig=0.138)	显著 (sig=0)	显著 (sig=0)

的显著性分析结果.从表 5 可以看出,在相同能见度下,驾驶模拟器运动系统对加速行为变量加速度和油门受力影响不显著.

当运动系统自由度相同时,晴天下 a_{max} , \bar{a} , $F_{a_{max}}$ 和 \bar{F}_a 的平均值相对于浓雾天分别高 20%, 22%, 32%和 36%(8 自由度驾驶模拟器)和 11%, 8%, 31%和 33%(固定底座驾驶模拟器);而 a_{max} 和 \bar{F}_a 的标准差则分别高 6%和 14%(8 自由度驾驶模拟器)和 4%和 15%(固定底座驾驶模拟器), \bar{a} 和 $F_{a_{max}}$ 标准差分别低 4%和 21%(8 自由度驾驶模拟器).独立样本 t 检验(见表 5)显示,当利用 8 自由度驾驶模拟器时,能见度对 a_{max} , \bar{a} , $F_{a_{max}}$ 和 \bar{F}_a 均有显著影响,而当利用固定底座驾驶模拟器时,能见度仅对 a_{max} 和 $F_{a_{max}}$ 有显著影响.两者对比表明运动系统自由度对低能见度下的加速行为影响更为显著.

3.2 减速行为变量

图 5 给出了 4 种实验场景下最大减速度和平均减速度的平均值及标准差.图 6 给出了 4 种实验场景下最大刹车板受力和平均刹车板受力的平均值及标准差.表 4 则比较了不同实验场景下各驾驶行为变量的相对差异.

从图 5、图 6 和表 4 可以得出,晴天时,固定底座

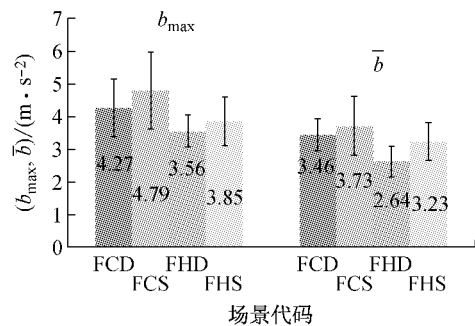


图 5 自由驾驶场景下的最大减速度和平均减速度

Fig.5 b_{max} and \bar{b} in free driving scenarios

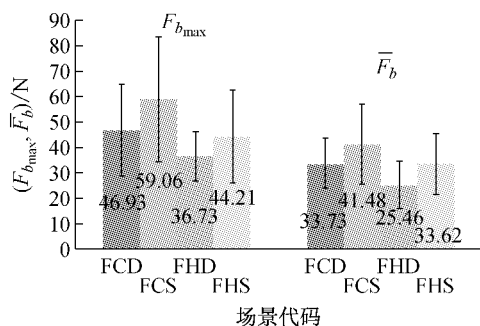


图 6 自由驾驶场景下的最大刹车板受力和平均刹车板受力

Fig.6 $F_{b_{max}}$ and \bar{F}_b in free driving scenarios

驾驶模拟器(FCS)获得的 b_{max} 平均值、 \bar{b} 平均值、 $F_{b_{max}}$

平均值和 \bar{F}_b 平均值分别比 8 自由度驾驶模拟器 (FCD)高 12%,7%,36%和 23%; b_{\max} 标准差、 \bar{b} 标准差、 $F_{b_{\max}}$ 标准差和 \bar{F}_b 标准差分别增加 32%,95%,24%和 56%。雾天时,固定底座驾驶模拟器(FCS)获得的 b_{\max} 平均值、 \bar{b} 平均值、 $F_{b_{\max}}$ 平均值和 \bar{F}_b 平均值分别比 8 自由度驾驶模拟器 (FCD)高 8%,22%,20%和 32%; b_{\max} 标准差、 \bar{b} 标准差、 $F_{b_{\max}}$ 标准差和 \bar{F}_b 标准差分别增加 56%,23%,86%和 26%。

表 5 总结了运动系统和能见度对驾驶行为变量的显著性分析结果.从表 5 可以看出,在相同能见度下,驾驶模拟器运动系统对减速行为变量减速度和刹车板受力影响显著。

当运动系统自由度相同时,晴天下 b_{\max} 、 \bar{b} 、 $F_{b_{\max}}$ 和 \bar{F}_b 的平均值相对于雾天分别高 17%,24%,22%和 25%(8 自由度驾驶模拟器)和 20%,13%,25%和 29%(固定底座驾驶模拟器);而 b_{\max} 、 \bar{b} 、 $F_{b_{\max}}$ 和 \bar{F}_b 的标准差则分别高 45%,2%,47%和 6%(8 自由度驾驶模拟器)和 37%,38%,25%和 24%(固定底座驾驶模拟器).独立样本 t 检验(见表 5)显示当利用 8 自由度驾驶模拟器时,能见度对 b_{\max} 、 \bar{b} 、 $F_{b_{\max}}$ 和 \bar{F}_b 均有显著影响,而当利用固定底座驾驶模拟器时,能见度仅对 b_{\max} 、 $F_{b_{\max}}$ 和 \bar{F}_b 有显著影响.两者对比表明,运动系统自由度对低能见度下的减速行为影响更为显著。

3.3 期望速度

图 7 给出了 4 种实验场景下期望速度的平均值及标准差.从图 7 可以看出,晴天时,8 自由度驾驶模拟器(FCD)获得的 v_0 平均值为 115.59 km·h⁻¹,固定底座驾驶模拟器(FCS)获得的 v_0 平均值则降低 5%(见表 4);8 自由度驾驶模拟器(FCD)获得的 v_0 标准差比固定底座驾驶模拟器(FCS)增加了 14%。雾天时,8 自由度驾驶模拟器(FHD)获得的 v_0 平均值为 75.02 km·h⁻¹,固定底座驾驶模拟器(FHS)获得的 v_0 平均值则降低了 11%;8 自由度驾驶模拟器(FHD)获得的 v_0 的标准差为 6.06 km·h⁻¹,与固定底座驾驶模拟器(FHS)获得的 v_0 的标准差相同.由表 5 可以看出,当能见度相同时,运动系统对期望速度 v_0 的影响不显著。

当运动系统自由度相同时,晴天下 v_0 的平均值和标准差分别提升了 35%和 9%(8 自由度驾驶模拟器)以及 40%和 14%(固定底座驾驶模拟器).独立样本 t 检验(见表 5)显示当运动系统相同时,能见度

对期望速度 v_0 有显著影响。

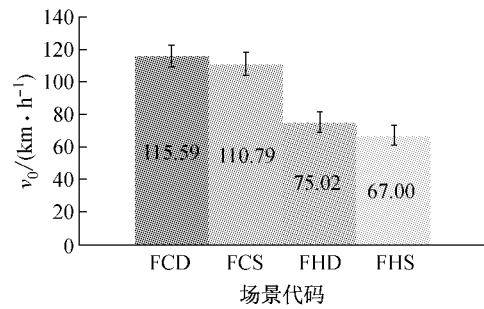


图 7 自动驾驶场景下的期望速度

Fig.7 Desired speed v_0 in free driving scenarios

3.4 讨论

驾驶模拟实验结果表明,驾驶模拟器运动系统自由度对驾驶员减速行为影响显著.8 自由度驾驶模拟器获得的减速度变量的均值和方差明显低于固定底座驾驶模拟器.在减速过程中,8 自由度驾驶模拟器通过沿轨道以一定减速度平移(约为 1.2 m·s⁻²)和以底座为支点前倾转动为驾驶员营造真实的受力感受,驾驶员会有明显的前倾感觉,产生不适.因此 8 自由度驾驶模拟器使驾驶员采用更为谨慎的减速行为且驾驶员间的异质性减小.8 自由度驾驶模拟器获得的加速行为的均值和方差略高于固定底座驾驶模拟器.在加速过程中,8 自由度驾驶模拟器通过沿轨道以较小加速度(约为 0.13 m·s⁻²)平移和以底座为支点后倾转动为驾驶员营造真实的受力感受,让驾驶员在加速时更加舒适,因此驾驶员会采用更为积极的加速行为.此外,不同的驾驶风险偏好导致驾驶员之间的异质性也增加.由于驾驶员通过观察屏幕中参照物的相对移动速度来调整驾驶速度,因此驾驶模拟运动系统自由度对驾驶员期望速度影响不显著。

能见度对驾驶员的驾驶行为的影响显著.在低能见度情况下,驾驶员的驾驶行为更加谨慎(加速行为为变量、减速行为为变量、期望速度平均值更小),不同驾驶员之间的差异性缩小(加速行为为变量、减速行为为变量、期望速度方差更小).这主要是因为低能见度下驾驶员视距变短,危险预警时间减少,使驾驶任务难度增加以致超过驾驶员的驾驶能力,因此驾驶员往往通过降低速度,采用稳健的加减速来增加危险预警时间,降低驾驶任务的难度使之与其驾驶能力相匹配。

4 结论

本文利用高逼真驾驶模拟器开展了晴雾天下驾

驶行为研究,分别分析了能见度相同时驾驶模拟器运动系统对驾驶行为的影响和运动系统自由度相同时能见度对驾驶行为的影响.实验结果表明,当能见度相同时,驾驶模拟器运动系统自由度对加速行为和期望速度影响不显著,对减速行为特别是对雾天下的减速行为影响显著;当驾驶模拟器运动系统自由度相同时,能见度对驾驶员的加减速行为和期望速度有显著影响.

参考文献:

- [1] 赵佳. 基于驾驶模拟实验的雾天对驾驶行为影响的研究[D]. 北京:北京交通大学,2012.
ZHAO Jia. Driving behavior under foggy weather using driving simulator [D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2012.
- [2] 祝站东, 荣建, 周伟. 不良天气条件下的驾驶行为研究[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版, 2010(5): 1040.
ZHU Zhandong, RONG Jian, ZHOU Wei. Driver behaves in bad weathers [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2010(5): 1040.
- [3] Hoogendoorn R G. Empirical research and modeling of longitudinal driving behavior under adverse conditions [D]. Delft: TRAIL Research School, 2012.
- [4] XU Zhi, YANG Xiaokuan, ZHAO Xiaohua, *et al.* Differences in driving characteristics between normal and emergency situations and model of car-following behavior [J]. Journal of Transportation Engineering, 2012, 138(11): 1303.
- [5] Davenne D, Lericollais R, Sagaspe P, *et al.* Reliability of simulator driving tool for evaluation of sleepiness, fatigue and driving performance [J]. Accident Analysis & Prevention, 2012, 45: 677.
- [6] Ting P H, Hwang J R, Doong J L, *et al.* Driver fatigue and highway driving: a simulator study [J]. Physiology & Behavior, 2008, 94(3): 448.
- [7] Philip P, Taillard J, Klein E, *et al.* Effect of fatigue on performance measured by a driving simulator in automobile drivers [J]. Journal of Psychosomatic Research, 2003, 55(3): 197.
- [8] Strayer D L, Drews F A, Johnston W A. Cell phone-induced failures of visual attention during simulated driving [J]. Journal of Experimental Psychology: Applied, 2003, 9(1): 23.
- [9] CHEN Ming, WANG Xuesong, ZHANG Hui, *et al.* Driver collision avoidance behavior under differing risk of rear-end scenarios [C]//Transportation Research Board 92nd Annual Meeting. [S. l.]: Transportation Research Board of the National Academics, 2013.
- [10] Lee, J D, McGehee D V, Brown T L, *et al.* Collision warning timing, driver distraction, and driver response to imminent rear-end collisions in a high-fidelity driving simulator [J]. Human Factors, 2002, 44(2): 314.
- [11] Hellanda A, Jenssen G D, Lervag L E, *et al.* Comparison of driving simulator performance with real driving after alcohol intake: a randomised, single blind, placebo-controlled, cross-over trial [J]. Accident Analysis and Prevention, 2013, 53: 9.
- [12] Weiler J M, Bloomfield J R, Woodworth G G, *et al.* Effects of fexofenadine, diphenhydramine, and alcohol on driving performance: a randomized, placebo-controlled trial in the Iowa driving simulator [J]. Annals of Internal Medicine, 2000, 132(5): 354.
- [13] Jamson H. Driving simulation validity: issues of field of view and resolution [C/CD]//DSC 2000. [S. l.]: Driving Simulation Conference, 2000.
- [14] Blana E. Driving simulator validation studies: a literature review[M]. Leeds: Institute for Transport Studies, 1996.
- [15] Repa B, Leucht P, Wierwille W. The effect of simulator motion on driver performance[C/CD]//SAE Technical Paper. [S. l.]: SAE, 1982.
- [16] Siegler I, Reymond G, Kemeny A, *et al.* Sensorimotor integration in a driving simulator: contributions of motion cueing in elementary driving tasks[C/CD]//DSC2001. Sophia Antipolis: [s. n.], 2001.
- [17] Reymond G, Kemeny A, Droulez J, *et al.* Role of lateral acceleration in curve driving: driver model and experiments on a real vehicle and a driving simulator [J]. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 2001, 44:483
- [18] Greenberg J, Artz B, Cathey L. The Effect of lateral motion cues during simulated driving [C]//DSC North America. Dearborn: DSC North American, 2003: 1-8.
- [19] Panerai F, Droulez J, Kelada J, *et al.* Speed and safety distance control in truck driving: comparison of simulation and real-world environment [C]//DSC 2001. [S. l.]: Driving Simulation Conference, 2001: 91-107.
- [20] Colombet F, Dagdelen M, Reymond G, *et al.* Motion cueing: what is the impact on the driver's behavior? [C]//DSC 2008. [S. l.]: Driving Simulation Conference, 2008: 1-10.