

基于高逼真驾驶模拟器雾霾天气下跟驰行为分析

时 恒, 涂辉招, 高 坤

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 为研究雾霾天气下车辆跟驰行为, 基于 8 自由度高逼真驾驶模拟器, 设置晴天和雾霾天两个实验场景, 采集不同交通状态下跟驰驾驶行为数据, 分析车头时距、车头间距、车头延迟时距、加速度、减速度等跟驰行为关键变量。实验结果表明, 雾霾天气显著影响了跟驰行为, 最大车头间距在自由流、拥挤流和阻塞流跟驰状态下分别增加了 8.7%、19.4% 和 25.6%; 自由流跟驰状态下最小车头间距减小了 13.0%; 阻塞流跟驰状态下最小车头时距减小了 47.9%, 但延迟时距及其离散性增加了 15.5% 和 28.2%; 雾霾天气下后车的加速行为更为谨慎。不同交通状态下的跟驰行为存在显著差异。随着跟驰车速增加, 最大、最小车头间距及其离散性显著增加; 最大、最小车头时距及其离散性则呈先增加后减小趋势, 延迟时距显著增加。

关键词: 雾霾天气; 交通状态; 跟驰行为

中图分类号: U491

文献标志码: A

Analysis of Car Following Behaviors Under Hazy Weather Conditions Based on High Fidelity Driving Simulator

SHI Heng, TU Huizhao, GAO Kun

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

Abstract: In order to investigate drivers' car following behaviors under hazy weather conditions, by using the high fidelity driving simulator with a motion system of 8 degrees of freedom, two scenarios, namely clear weather conditions and hazy weather conditions, were established to collect and analyze the key variables of car following behaviors including the time/distance headway, delay time and acceleration/deceleration rate at different car following stages under different traffic conditions. Compared to the clear weather conditions, the results indicate that hazy weather conditions have significant effects on drivers' car following behaviors;

the maximum distance headway significantly increases by 8.7%, 19.4%, and 25.6% under car following stages in case of free-flow conditions, congested conditions, and jam conditions, respectively. The minimum distance headway significantly increases by 13.0% under car following stage in case of free-flow conditions. The minimum time headway significantly decreases by 47.9%, and the mean value and the discreteness of the delay time significantly increases by 15.5% and 28.2% respectively, under car following stage in case of jam conditions. Drivers become more cautious in accelerating under hazy weather conditions. There exist significant differences in car following behavior at car following stages under different traffic conditions. With the increasing speeds, both the mean value and the discreteness of the maximum/minimum distance headway and the delay time increase significantly, while the time headway decreases followed by increasing afterwards.

Key words: hazy weather conditions; traffic conditions; car following behaviors

近几年, 雾霾几乎已成为中国大部分城市重点关注的天气状况。2015 年 11—12 月, 全国出现 7 次大范围、连续性雾霾天气, 持续时间最长达 5 d, 影响范围达 35.2 万 km²[1]。雾霾对身心健康带来威胁的同时, 也大大影响了交通效率和交通安全。解析雾霾天气下驾驶行为, 可为分析雾霾天气下交通安全提供理论依据。但由于雾霾天具有能见度低、影响范围大等特征, 传统数据采集手段难以获取有效的驾驶行为信息。驾驶模拟器利用虚拟现实仿真技术模拟现实驾驶环境, 实现动态的模拟驾驶, 研究驾驶人员在不同道路交通环境中的驾驶行为特性和驾驶期望机理等[2]。近年来驾驶模拟器得到了广泛的推广和应用, 如同济大学交通运输工程学院驾驶模拟实验

收稿日期: 2017-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(71271155); 上海市科学技术委员会资助项目(16DZ1203903)

第一作者: 时 恒(1990—), 男, 博士生, 主要研究方向为驾驶行为、道路交通风险评估。

E-mail: 0725shiheng@tongji.edu.cn

通讯作者: 涂辉招(1977—), 男, 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



扫码
查看
作者
独家
介绍

室、公安部交通管理科学研究所、武汉理工大学智能交通系统中心等数家单位的驾驶模拟器已投入使用,为采集较为准确的第一手驾驶行为数据提供了可能性的同时也将更好地模拟车辆跟驰等驾驶行为,为研究雾霾天气下的驾驶行为提供了可能性。雾霾天低能见度的特点对驾驶行为有显著影响^[3],部分学者对不同环境下驾驶行为的差异性进行了研究,如加减速特性^[4]、车头间距^[5]以及反应时间特性^[6]等。涂辉招等^[3]分析了驾驶员在晴天天气和雾霾天气下的自由驾驶行为差异性,得出了在低能见度情况下,驾驶员加减速行为变量和期望速度的平均值及方差较小,说明驾驶员在能见度较低时会更加谨慎地驾驶车辆,并且不同驾驶员之间的差异性较小。Evans^[7]在其研究中指出,由于能见度的影响,驾驶员在雾天会减小车头间距使前车在视距范围内,以更好地判断前车的行驶状态。同时,Cavallo^[8]发现雾会降低周围环境对驾驶员的刺激,使得驾驶员低估前车的行驶速度,所以驾驶员在雾天跟驰过程中有减小车头间距的趋势。相对于前车速度,后车驾驶员更容易判断车头间距^[5],从而采取相应的驾驶策略维持期望车头间距。当车头间距与驾驶员期望不符时,后车驾驶员通过调整速度来保持期望车头间距。车流中行驶车辆速度的变化是影响交通流稳定的因素之一^[9]。Hoogendoorn等^[10]通过驾驶模拟实验分析了雾天驾驶员跟驰行为,发现在雾天后车加速度和速度相对晴天较小,雾天基于Helly跟驰模型和IDM跟驰模型的仿真结果也显示最大加速度和最大减速度相对于晴天明显减小,并且两个模型中表征车头间距的参数明显变大,说明雾天驾驶员对车头间距更为敏感。

以往研究多针对晴天和雾霾天的驾驶行为差异性进行分析,而较少关注不同交通状态下驾驶行为特别是跟驰行为的差异。本研究基于同济大学8自由度高逼真驾驶模拟器,构建晴天和雾霾天两个实验场景,在每个实验场景下分别进行自由流、拥挤流和阻塞流跟驰驾驶模拟实验,采集驾驶员在两个场景不同交通状态下的跟驰行为数据,分析晴天和雾霾天不同交通流跟驰状态下后车延迟时距、车头间距、车头时距和加速、减速行为等在晴天和雾霾天的差异。

1 研究方法

1.1 跟驰行为变量

1.1.1 延迟时距

延迟时距是指后车在前车行驶状态改变后随之

改变行驶状态的时间间隔,表征了后车受到前车刺激时改变自身行驶状态的灵敏程度。

Zhang等^[11]在研究中提出了驾驶员延迟时距的标定方法,以 $\pm 0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 作为前后车加、减速度变化的阈值,以前后车加、减速度变化阈值时刻的时间间隔作为跟驰行为延迟时距。本研究前车的加、减速度并非连续变化,借鉴Zhang等^[11]提出的研究成果,以前车加速度改变的時刻为 T_f ,后车加速度阈值 $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 出现时刻为 T_b ,根据式(1)确定跟驰行为延迟时距。延迟时距 T 的标定方法如图1所示。

$$T = T_f - T_b \quad (1)$$

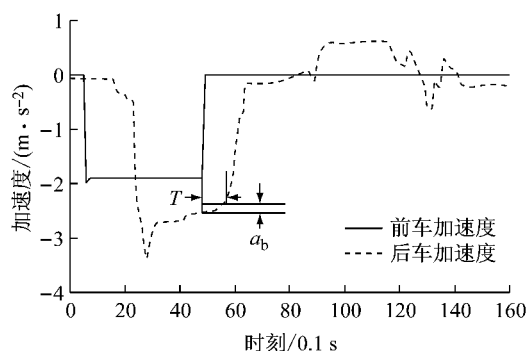


图1 驾驶员跟驰行为延迟时距标定方法

Fig.1 Calibration method of drivers' delay time in car following process

1.1.2 车头间距、车头时距

车头时距描述了相同车道上连续的前后两车通过同一道路断面的时间间隔,排除了速度对前后两车空间距离的影响,是描述前后两车时空特性的重要指标。后车驾驶员会通过改变行驶速度以维持理想的的车头间距,从而保证一定的车头时距^[5]。跟驰过程中的最大车头间距是后车驾驶员为了维持跟驰状态能够接受的最大距离,最小车头间距是驾驶员能够接受的最小安全距离。分别统计后车驾驶员在自由流、拥挤流和阻塞流状态下平稳跟驰过程中能够接受的最大车头间距时的车头时距(记为最大车头时距)、最小车头间距时的车头时距(记为最小车头时距)和 T_b 时刻的车头时距,分析雾霾天气对驾驶员车头时距的影响。后车驾驶员在 T_b 时刻的车头间距(记为 D)、最大车头间距(记为 D_m)和最小车头间距(记为 D_n)的标定方法见图2。

1.1.3 加速、减速行为

后车驾驶员的加、减速行为描述了后车驾驶员跟驰过程中的速度策略,是跟驰行为的重要组成部分,也是影响交通流稳定的重要因素^[9]。后车在平稳跟驰过程中加、减速度的大小描述了后车驾驶员加

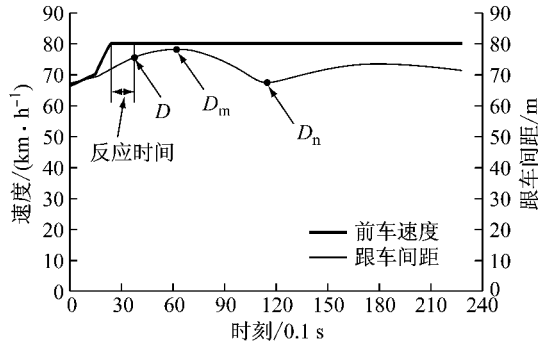


图 2 跟驰过程车头间距标定方法

Fig.2 Calibration method of space headway in car following process

速、减速的意愿大小,每间隔 0.1 s 记录一次后车的加速度和减速度,分别统计晴天和雾霾天后车在自由流、拥挤流和阻塞流状态下平稳跟驰过程中的加速度和减速度,分析晴天、雾霾天不同交通状态对后车驾驶员加、减速行为的影响。

1.2 高逼真驾驶模拟实验

1.2.1 实验设备

本次实验使用同济大学高逼真度驾驶模拟器,如图 3 所示.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 SCANeR™软件来控制整个驾驶模拟器.该驾驶模拟器配备了 8 自由度的运动系统,此运动系统可以开启和关闭。

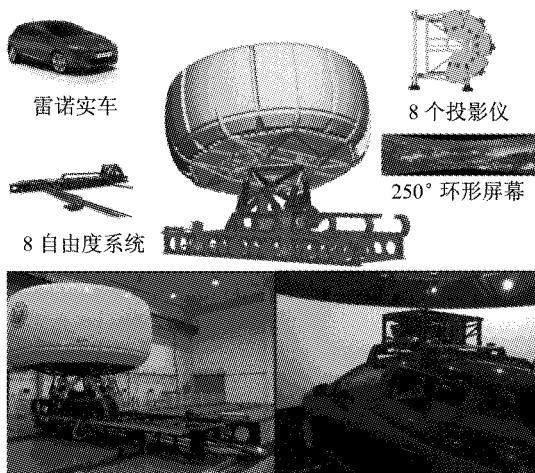


图 3 同济大学 8 自由度驾驶模拟器

Fig.3 High fidelity driving simulator in Tongji University

1.2.2 实验方案

根据雾的等级划分(GB/T 27964—2011),能见度为 80 m 时已属于雾霾天气,需要对高速公路上的车流进行管理与控制以保证交通安全.本实验设置

驾驶模拟器实验场景的最大能见度为 80 m,以模拟雾霾天的驾驶环境;设置实验场景能见度 > 1 000 m,以模拟晴天的驾驶环境.图 4 给出了晴天(图 4a)和雾霾天(图 4b)跟驰实验的场景设置示例。



a 晴天跟驰实验场景



b 雾霾天跟驰实验场景

图 4 雾霾天和晴天跟驰实验场景示例

Fig.4 Scenarios in haze and clear weather conditions

在晴天和雾霾天驾驶模拟实验场景中,每位驾驶员将分别在双向四车道限速 120 km · h⁻¹ 的高速公路上跟驰前车行驶,前车由静止加速至低速(10 km · h⁻¹,模拟阻塞流跟驰),在低速匀速行驶一段时间后加速至中速(40 km · h⁻¹,模拟拥挤流跟驰),之后再中速平稳行驶一段时间后加速至高速(80 km · h⁻¹,模拟自由流跟驰)并在高速平稳行驶一段时间.记前车加速度改变的时刻为 P_A (action point),跟驰过程中前车的速度轨迹将包括图 5 所示的 3 个加速度改变时刻(P_{A1} ~ P_{A3})以标定不同跟驰状态下后车的延迟时距等跟驰行为变量,P_{A1} ~ P_{A3} 的含义和对应的延迟时距如表 1 所示。

表 1 P_A 时刻含义及对应延迟时距意义

Tab.1 Action points and physical meanings

时刻	含义	对应延迟时距
P _{A1}	前车加速至低速时刻	阻塞流跟驰状态延迟时距
P _{A2}	前车加速至中速时刻	拥挤流跟驰状态延迟时距
P _{A3}	前车加速至高速时刻	自由流跟驰状态延迟时距

1.2.3 实验样本

驾驶模拟实验样本量大小主要参考以往研究(12~32 名驾驶员不等)^[12-14],选定了 32 名驾驶员进

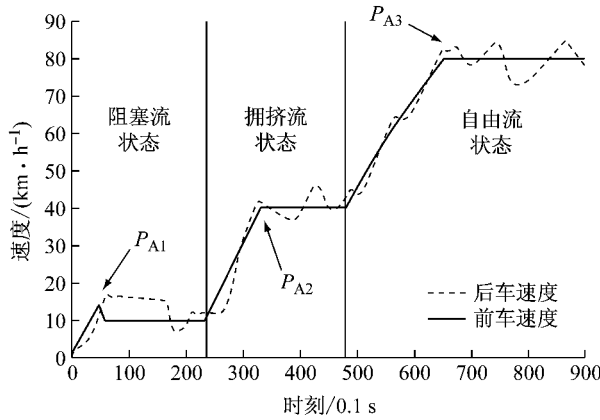


图 5 跟驰实验前车速度轨迹设置

Fig.5 Speed as a function of time slides of leading car

行实验.表 2 给出了参与实验驾驶员的基本信息,他们都拥有合格的驾驶证,无驾驶模拟症.

表 2 参与实验驾驶员基本信息

统计参数	平均值/年	范围/年	标准差/年
年龄	39.8	36~44	3.0
驾龄	9.4	6~13	3.3

1.2.4 数据采集

每位驾驶员将被告知应遵守的操作规范,并熟悉驾驶模拟器.随后驾驶员在实验环境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、平稳行驶等过程,同时驾驶员也将熟悉踩踏油门和刹车板的动作,与此同时,观察员将确认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.在驾驶实验进行的过程中记录下前、后车的行驶轨迹数据,包括速度、加速度、车头间距等跟驰行为变量.

表 4 不同交通状态下最大、最小车头间距、时距差异显著性检验

检验变量	天气状态	均值差异性检验	方差齐性检验	(自由流-拥挤流)/阻塞流		(拥挤流-阻塞流)/阻塞流	
				均值/%	标准差/%	均值/%	标准差/%
最大车头间距	晴天	** 显著(0.000)	** 显著(0.000)	71.3	70.7	17.5	26.4
	雾霾天	** 显著(0.000)	* 显著(0.085)	55.9	36.5	11.7	7.4
最小车头间距	晴天	** 显著(0.000)	** 显著(0.007)	76.6	-3.1	74.7	101.6
	雾霾天	** 显著(0.000)	** 显著(0.003)	64.4	-15.0	87.1	64.7
最大车头时距	晴天	** 显著(0.000)	不显著(0.532)	59.1	17.9	-58.7	-8.8
	雾霾天	** 显著(0.000)	** 显著(0.024)	82.9	118.9	-56.2	-40.7
最小车头时距	晴天	* 显著(0.053)	** 显著(0.013)	77.0	64.2	-58.5	-83.3
	雾霾天	** 显著(0.000)	** 显著(0.000)	97.5	221.2	-13.7	-23.8

注: * $\alpha=0.1$; ** $\alpha=0.05$.

对比不同交通状态下跟驰行为的车头时距和车头间距特性,从表 4 可以看出,拥挤流跟驰状态下的最大车头时距和最小车头时距相对于自由流和阻塞

2 实验结果与分析

2.1 雾霾天气对车头时距、车头间距的影响

图 6 给出了晴天和雾霾天不同交通流跟驰状态下最大、最小车头时距、间距的累积概率分布.最大车头时距在不同交通状态下存在较大异质性(图 6a),最小车头时距在不同交通状态下的异质性则较小(图 6b).最大车头间距和最小车头间距在不同交通状态下存在较大异质性.以 T 检验或秩和检验判断均值差异性,以 F 检验判断方差齐性,表 3 给出了晴天和雾霾天车头间距、时距的差异显著性检验.以 Kruskal-Wallis 检验判断均值差异性,以单因素方差分析判断方差齐性,表 4 给出了不同交通状态下车头间距、车头时距的差异显著性检验.

表 3 晴天和雾霾天最大、最小车头间距、时距差异显著性检验

Tab.3 Significant tests for maximum/minimum distance/time headways under clear and hazy weather conditions

检验变量	交通状态	均值检验	方差检验	(雾霾天-晴天)/晴天	
				均值/%	标准差/%
最大车头间距	自由流	* 显著	不显著	8.7	5.6
	拥挤流	* 显著	不显著	19.4	32.1
	阻塞流	** 显著	* 显著	25.6	55.3
最小车头间距	自由流	* 显著	不显著	-13.0	-21.9
	拥挤流	不显著	不显著	-6.5	-11.0
	阻塞流	不显著	不显著	-12.7	9.0
最大车头时距	自由流	不显著	不显著	8.9	4.6
	拥挤流	不显著	* 显著	-5.3	-43.6
	阻塞流	不显著	不显著	-10.8	-13.3
最小车头时距	自由流	不显著	* 显著	21.0	49.8
	拥挤流	不显著	不显著	8.5	-23.4
	阻塞流	** 显著	** 显著	-47.9	83.2

注: * $\alpha=0.1$; ** $\alpha=0.05$.

流较小,说明驾驶员在拥挤流跟驰状态具有更大的信心以较小的车头时距跟驰前车行驶.在阻塞流跟驰状态,由于当前车速较低,车头时距较大,随着速

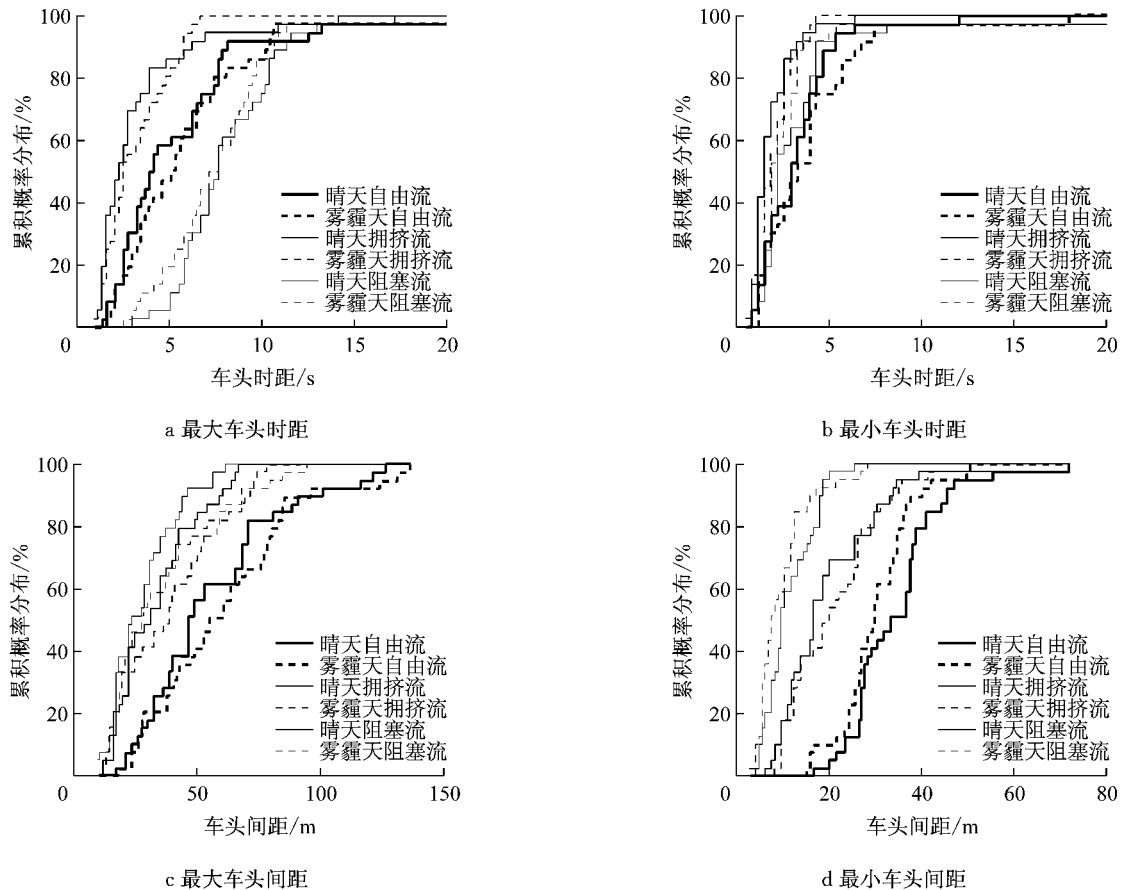


图6 不同交通状态下驾驶员最大、最小车头时距、间距累积概率分布

Fig.6 Cumulative probability distributions of maximum/ minimum distance/time headways under different traffic conditions

度的增加,车头时距随之减小,拥挤流跟驰状态的最大车头时距相对阻塞流跟驰状态在晴天和雾霾天分别减小了58.7%和56.2%,最小车头时距分别减小了58.5%和13.7%。当车速较高时,后车驾驶员为了保证行驶安全以较大的车头间距跟驰前车行驶,此时的车头时距相对于中速跟驰状态显著增加,其中自由流跟驰状态下最大车头时距相对于拥挤流跟驰状态在晴天和雾霾天分别增加了59.1%和82.9%,最小车头时距分别增加了77.0%和97.5%。从表4还可以看出,随着车速的提高,最大车头间距及其离散性随之显著增加,说明车速越高,车流密度越低且稳定性越差。

对比晴天和雾霾天车头间距和时距特性,从表3可以看出,雾霾天气对不同交通状态的最大车头间距都有显著影响,雾霾天气下最大车头间距在自由流、拥挤流和阻塞流跟驰状态下分别增加了8.7%、19.4%和25.6%;雾霾天气对车头时距的影响较小,主要影响了阻塞流跟驰状态下的最小车头时距,使得最小车头时距减小了47.9%,同时使得其离散性增加了83.2%。对比结果说明雾霾天气由于其能见

度低的特性,会影响后车驾驶员的空间距离感知,但是对驾驶员的时间间隔感知影响较小。

雾霾天自由流状态下驾驶员灵活性较大,虽然最大车头间距显著增加了,但由于能见度低,驾驶员对交通流环境反应时间增加(即延迟时距增加),导致了最小的车头时距显著减少。雾霾天3种交通状态下的最大车头间距相比晴天都显著增加,说明雾霾天车头间距的离散性大大增加。虽然,驾驶员在雾天采取了更为谨慎的驾驶行为(最大车头间距增加),但同时雾霾天气下交通风险也显著增加(最小的车头间距和车头时距都显著减少)。

2.2 雾霾天气对延迟时距的影响

图7给出了不同交通流跟驰状态下延迟时距的累积概率分布,随着速度的增加,延迟时距的均值和标准差都有增加的趋势(图7d)。说明在阻塞流跟驰状态下,由于前后车行驶速度较低且车头间距较小,后车驾驶员会更快地对前车的刺激做出反应,随着速度的增加,车头间距随之增大,后车驾驶员判断前车行驶状态的难度增加,其反应变得相对迟缓,导致延迟时距增加。

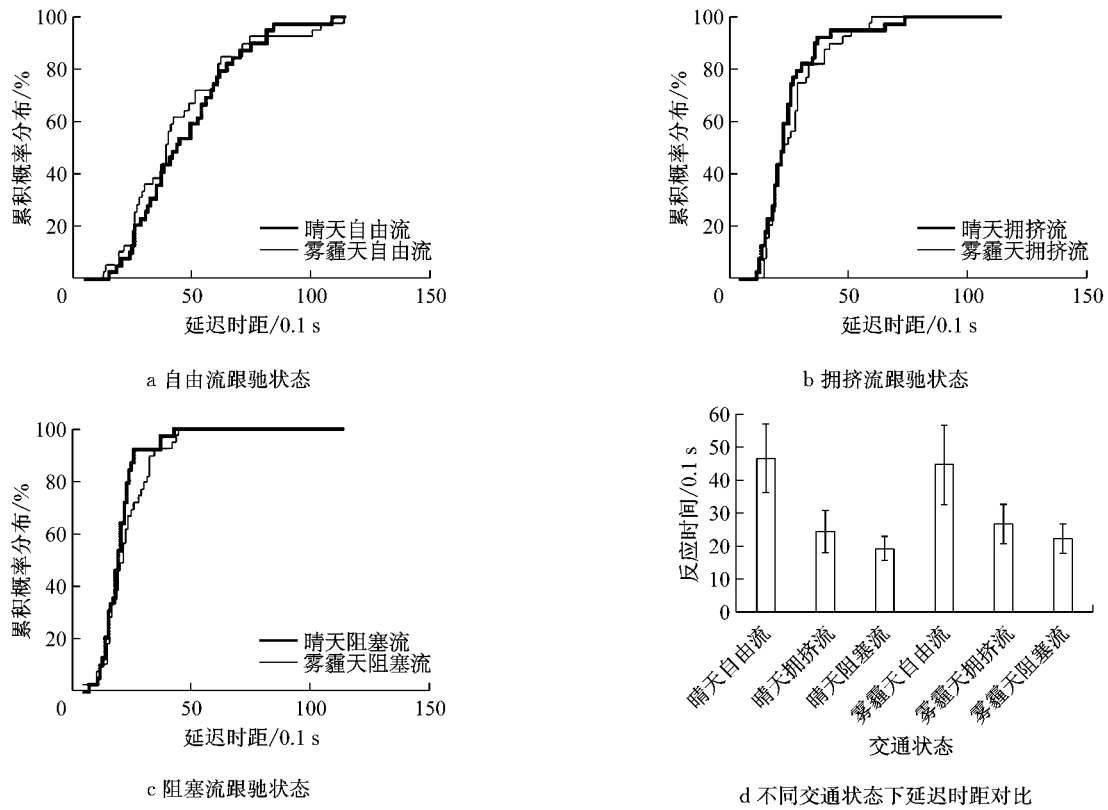


图 7 不同交通状态下延迟时距累积概率分布

Fig. 7 Cumulative probability distributions of delay time under different traffic conditions

表 5 给出了不同交通流跟驰状态下延迟时距在晴天和雾霾天的均值和标准差及其差异性检验. 自由流和拥挤流跟驰状态下,延迟时距在晴天和雾霾天的差异性不显著,而阻塞流跟驰状态下存在显著性差异. 对比结果说明:当行驶速度较大时,后车驾驶员更期望保持较大的跟车间距,从而避免频繁地对前车的行驶状态做出反应,此时雾霾天气对后车行驶策略的影响较小. 而当速度较低时,雾霾天气会显著地影响驾驶员对前车的感知,从而影响后车的行驶策略,使得延迟时距比晴天增加了 15.5%,并且其离散性增加了 28.2%. 驾驶员反应时间的增加是导致延迟时距增加的主要因素,同时也导致了最小车头时距显著减小.

表 5 晴天和雾霾天气下延迟时距均值、标准差及其差异性检验

Tab.5 Significant tests for differences of mean value and standard deviation of delay time under clear and haze weather conditions

交通状态	均值差异性	方差齐性	(雾霾天-晴天)/晴天	
			均值/%	标准差/%
自由流	不显著(0.706)	不显著(0.630)	-4.3	14.7
拥挤流	不显著(0.429)	不显著(0.642)	8.9	-6.3
阻塞流	*显著(0.092)	*显著(0.085)	15.5	28.2

注: * $\alpha=0.1$, ** $\alpha=0.05$.

从表 6 可以看出,在晴天和雾霾天气下,不同交通流跟驰状态下的延迟时距存在显著性差异,随着速度增加,延迟时距及其离散性显著增加.

表 6 不同交通状态下延迟时距均值、标准差及其差异性检验

Tab.6 Significant tests for differences of mean value and standard deviation of delay time under different traffic conditions

天气状态	均值差异性	方差齐性	(自由流-拥挤流)/拥挤流		(拥挤流-阻塞流)/阻塞流	
			均值/%	标准差/%	均值/%	标准差/%
晴天	**显著(0.000)	**显著(0.000)	89.8	64.9	27.2	79.9
雾霾天	**显著(0.000)	**显著(0.000)	66.7	102.7	20.2	31.4

注: * $\alpha=0.1$; ** $\alpha=0.05$.

2.3 雾霾天气对驾驶员加速、减速行为的影响

图 8 描述了晴天和雾霾天驾驶员在不同交通流跟驰状态下的加、减速特性.

在自由流、拥挤流和阻塞流跟驰状态下后车加速度在雾霾天的最大值均小于晴天(表 7),说明驾驶员在雾霾天的加速行为更为谨慎. 后车在整个平稳跟驰过程中的加速度和减速度均值为正值,说明处

在跟驰过程中的后车驾驶员存在加速的趋势,并且在拥挤流跟驰状态下的加速趋势大于自由流和阻塞流跟驰状态(图 8d). 从不同交通状态下的后车加、减速行为的对比结果来看,随着速度的增加,后车加速

度和减速度的标准偏差随之减小,说明加速度和减速度离散程度变小,后车驾驶员会更谨慎地驾驶车辆.

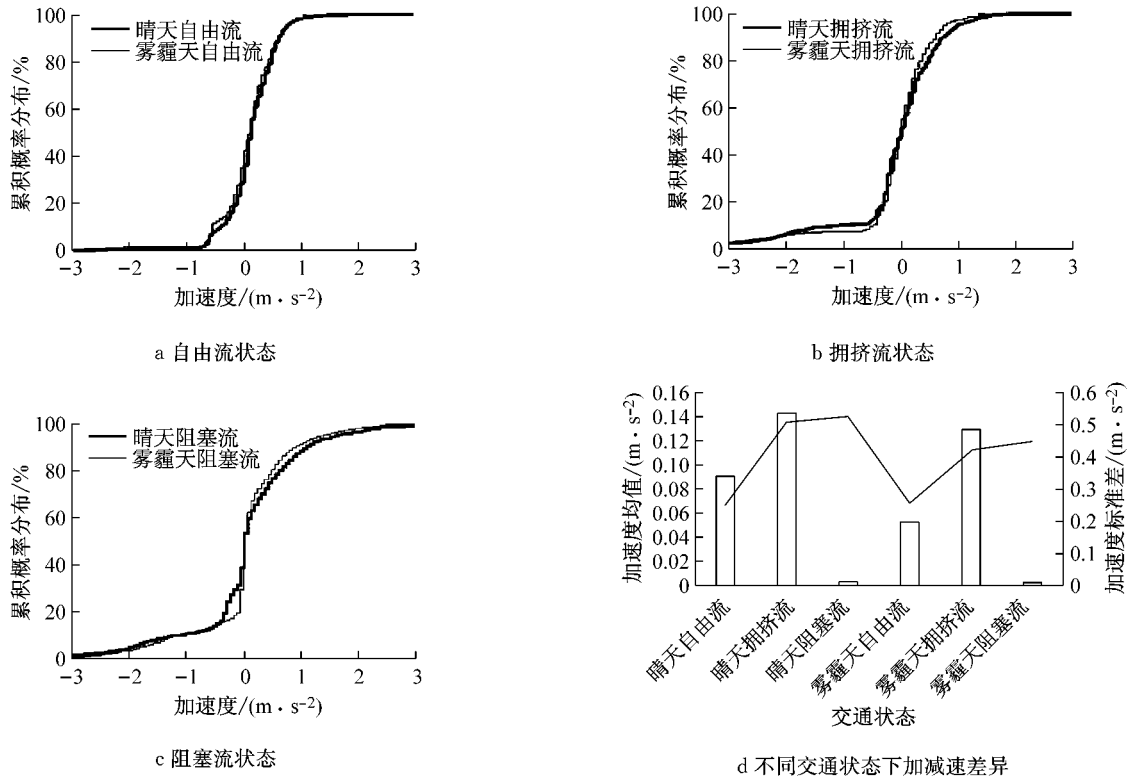


图 8 不同交通状态下驾驶员加、减速行为特征

Fig.8 Features of drivers' acceleration/deceleration behaviors under different traffic conditions

表 7 加、减速度统计描述

Tab.7 Statistical description of acceleration/deceleration rate

天气状况	交通状态	样本长度	均值/ ($m \cdot s^{-2}$)	标准误差/ ($m \cdot s^{-2}$)	中值/ ($m \cdot s^{-2}$)	标准偏差/ ($m \cdot s^{-2}$)	标准方差/ ($m \cdot s^{-2}$)	最大值/ ($m \cdot s^{-2}$)	最小值/ ($m \cdot s^{-2}$)
晴天	自由流	17 873	0.090 3	5.05×10^{-6}	0.087	0.501	0.251	1.888	-4.876
	拥挤流	11 793	0.143 3	-1.21×10^{-5}	-0.010	1.017	1.035	3.099	-5.020
	阻塞流	15 242	0.003 4	-2.21×10^{-7}	-5.34×10^{-6}	1.047	1.096	4.056	-5.505
雾霾天	自由流	16 294	0.052 3	3.21×10^{-6}	0.082	0.510	0.260	1.779	-4.768
	拥挤流	10 897	0.129 3	-1.19×10^{-5}	-0.022	0.845	0.714	3.013	-6.315
	阻塞流	14 022	0.002 5	1.81×10^{-7}	1.65×10^{-5}	0.893	0.798	3.411	-6.381

3 结论

本文基于 8 自由度高逼真度驾驶模拟器,构建晴天和雾霾天两个实验场景,分析了自由流、拥挤流和阻塞流交通状态下的延迟时距、车头间距、车头时距和后车的加速、减速行为等跟驰行为关键变量,主要结论如下:

拥挤流交通状态下的驾驶员具有更大的信心以更小的车头时距跟驰前车行驶,其车头时距及其离

散性相对自由流和阻塞流跟驰状态较小.阻塞流交通状态下,雾霾天气下驾驶员更谨慎的驾驶是导致延迟时距增加、最小车头时距显著减小的主要原因.

雾霾天气显著影响了驾驶员的车头间距感知,对车头时距感知的影响却较小.同时,雾霾天气显著影响了跟驰行为,最大车头间距在自由流、拥挤流和阻塞流跟驰状态下分别增加了 8.7%、19.4%和 25.6%;自由流跟驰状态下最小车头间距减小了 13.0%;阻塞流跟驰状态下最小车头时距减小了 47.9%,但延迟时距及其离散性增加了 15.5%和 28.2%.

参考文献:

- [1] 袁媛,周宁芳,李崇银. 中国华北雾霾天气与超强 El Nino 事件的相关性研究[J]. 地球物理学报, 2017, 60(1): 11.
YUAN Yuan, ZHOU Ningfang, LI Congyin. Correlation between haze in North China and super EI Niño events[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(1): 11.
- [2] 王晶,刘小明,李德慧. 驾驶模拟器现状及应用研究[J]. 交通标准化, 2008(11): 160.
WANG Jing, LIU Xiaoming, LI Dehui. Driving simulator status quo and application research [J]. Communications Standardization, 2008(11): 160.
- [3] 涂辉招,李振飞,孙立军. 驾驶模拟器运动系统对自由驾驶行为的影响分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(11): 1696.
TU Huizhao, LI Zhenfei, SUN Lijun. Effects of motion system of driving simulator on free driving behaviors[J]. Journal of Tongji University(National Science), 2015, 43(11): 1696.
- [4] TU H, LI Z, LI H, *et al.* Driving simulator fidelity and emergency driving behavior [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2015(2518): 113.
- [5] KANG J J, NI R, ANDERSEN G J. Effects of reduced visibility from fog on car-following performance [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2008(2069): 9.
- [6] 何莎,闫学东,庞洪涛,等. 雾天对驾驶行为的影响研究——避撞驾驶行为[J]. 交通信息与安全, 2014, 32(5): 126.
HE Sha, YAN Xuedong, PANG Hongtao, *et al.* Effects of fog conditions on driving behaviors-crash avoidance driving behaviors [J]. Journal of Transportation Information and Safety, 2014, 32(5): 126.
- [7] EVANS L. Traffic safety and the driver[C]//World Congress of the International Association for Accident and Traffic Medicine. Singapore: Science Serving Society,1995: 256-256.
- [8] CAVALLO V. Perceptual distortions when driving in fog[C]//Proc 2nd International Conference on Traffic and Transportation Studies. Shanghai:[s. n.], 2002:965-972.
- [9] ZHOU W. Analysis of distance headway [J]. Journal of Southeast University, 2003, 19(4): 378.
- [10] HOOGENDOORN R, TAMMINGA G, HOOGENDOORN S P, *et al.* Longitudinal driving behavior under adverse weather conditions; adaptation effects, model performance and freeway capacity in case of fog[C]//Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2010 13th International IEEE Conference on. [S.l.]: IEEE,2010: 450-455.
- [11] ZHANG X, BHAM G H. Estimation of driver reaction time from detailed vehicle trajectory data [J]. MOAS, 2007(7): 574.
- [12] BELLA F. Parameters for evaluation of speed differential: contribution using driving simulator [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2007(2023): 37.
- [13] REYNER L, WELLS S J, MORTLOCK V, *et al.* "Post-lunch" sleepiness during prolonged, monotonous driving—effects of meal size[J]. Physiology & Behavior, 2012, 105(4): 1088.
- [14] YANG Q, OVERTON R, HAN L, *et al.* The influence of curbs on driver behaviors in four-lane rural highways—a driving simulator based study[J]. Accident Analysis & Prevention, 2013(50): 1289.
- [18] HAMDAR S H. Modeling driver behavior as a stochastic hazard-based risk-taking process [D]. Evanston: Northwestern University, 2009.
- [19] WEI C. Developing freeway lane-changing support systems using artificial neural networks [J]. Journal of Advanced Transportation, 2010, 35(1): 47.
- [20] BALAL E, CHEU R L, SARKODIE-GYAN T. A binary decision model for discretionary lane changing move based on fuzzy inference system[J]. Transportation Research Part C, 2016, 67: 47.
- [21] MORIDPOUR S. Analysing the performance of a fuzzy lane changing model using data mining[J]. Data Mining in Dynamic Social Networks and Fuzzy Systems, 2013. DOI: 10.4018/978-1-4666-4213-3.ch013.
- [22] ZHAO D, PENG H, NOBUKAWA K, *et al.* Analysis of mandatory and discretionary lane change behaviors for heavy trucks [C/CD] // Proceedings of the 12th International Symposium on Advanced Vehicle Control. Tokyo: Tokyo University of Agriculture and Technology, 2014.
- [23] 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]. Washington D C: National Highway Traffic Safety Administration, 2006.
- [24] UCHIDA N, KAWAKOSHI M, TAGAWA T, *et al.* An investigation of factors contributing to major crash types in Japan based on naturalistic driving data[J]. IATSS Research, 2010, 34(1): 22.
- [25] FITCH G M, HANOWSKI R J. Using naturalistic driving research to design, test and evaluate driver assistance systems [M] // Handbook of Intelligent Vehicles. London: Springer, 2012: 559-580.
- [26] OLSEN E C B. Modeling slow lead vehicle lane changing[D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.

(上接第 325 页)