

学校代码: 10286
分 类 号: U471.1
密 级: 公开
U D C: 625
学 号: 082200



东南大学
SOUTHEAST UNIVERSITY
硕士学位论文

驾驶人行为特性对交通流的影响研究

研究生姓名: 吴璠
导师姓名: 陆建教授

申请学位类别 硕士 学位授予单位 东南大学
一级学科名称 交通运输规划与管理 论文答辩日期 _____
二级学科名称 _____ 学位授予日期 _____
答辩委员会主席 _____ 评 阅 人 _____

2011 年 4 月 11 日

STUDY ON THE IMPACT OF DRIVER BEHAVIOR CHARACTERISTICS ON TRAFFIC FLOW

A Dissertation Submitted to
Southeast University
For the Academic Degree of Master of Engineering

BY
WU Fan

Supervised by:
Prof. LU Jian

Southeast University
April 11, 2011

东南大学学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得东南大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名: _____ 日期: _____

东南大学学位论文使用授权声明

东南大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆有权保留本人所送交学位论文的复印件和电子文档，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外，允许论文被查阅和借阅，可以公布（包括刊登）论文的全部或部分内容。论文的公布（包括刊登）授权东南大学研究生院办理。

研究生签名: _____ 导师签名: _____ 日期: _____

摘要

驾驶人是道路交通系统中最活跃的要素。不同驾驶人驾驶行为存在差异，同一名驾驶人在不同的外部环境和自身状态下的驾驶行为也不同。长期以来，我国机动车驾驶人均为专业驾驶人，随着大量小汽车进入家庭，产生了大量的非专业驾驶人。非专业驾驶人驾驶操作行为方面与专业驾驶人都存在差异。通过研究驾驶人行为特性及其对交通流的影响，将有助于对驾驶特性、驾驶行为与道路交通流的影响关系有更加深刻的理解。

本文分别以专业和非专业驾驶人为研究对象，选择典型的城市道路，在良好天气条件下，通过使用 GPS 和激光测距仪的跟车实验采集实际交通流状态下驾驶人的跟车速度、跟车间距、加速度等驾驶行为的主要参数。根据实验所得的测试车轨迹数据与其邻近车辆的相对速度和相对位置的时间序列数据，分析了驾驶人在真实驾驶环境中的自由行驶与跟驰的临界点特性、跟驰距离选择、加速度选择特性。通过对数据的集计分析以及跟驰模型的参数标定，分析并比较了驾驶过程中的不同驾驶人行为的异同。最后应用交通仿真程序 SUMO，针对不同情况分别进行模拟研究。通过对驾驶人模型参数以及不同类型驾驶人混合比例的调整，研究了驾驶人行为特性对路段交通流的效率和安全特性的影响。

研究结果表明专业和非专业两组驾驶人的跟驰与自由流临界点特性方面存在差异。参数标定结果表明，驾驶人在期望速度和最大减速度方面存在差异。模拟研究发现，期望车速的改变对速度流量基本图上的曲线形状产生影响，且这种影响主要在自由流阶段。期望速度的增加导致碰撞时间 TTC 倒数的绝对值的时间平均值增加，这表明期望速度的增加对交通流的安全性存在负面影响。最大减速度的增加导致密度流量图上较难达到通行能力的区域。随着最大减速度的增加 TTC 倒数绝对值呈现先减小后增大的趋势，这表明存在不同最大减速驾驶人的最佳混合比例，从而使得 TTC 倒数绝对值的时间密度最小。专业驾驶人(低期望速度，高最大减速度)的增加导致相同流量下 TTC 倒数绝对值的最大值增加，交通流偏向不安全的方向。

本文的结果表明期望车速及最大减速度对交通流的效率性及安全性存在不同特点和程度的影响，而主要的影响因素是驾驶人的最大减速度。现有证据表明驾驶人行为特性对交通流的效率性和安全性存在不可忽略的影响。

关键词：驾驶人行为，交通流，驾驶人差异性，期望速度，减速度

Abstract

Driver is the most active part of road traffic system. Different drivers differ in driving behaviors, a driver also adapts his behavior to different external or internal states. For a long time in China, all drivers are professional drivers. However, with the boom of private cars, a lot of regular drivers emerged. Regular drivers show different driving behaviors in comparison with professional drivers. It is hopefully that through the investigation of the impact of driver behavior characteristics on traffic flow, a better understanding of driver behavior characteristics and the connection between driver behavior and traffic flow will be achieved.

A field car-following experiment featuring GPS and laser ranging was carried out to collect information about driver behaviors for both professional and regular drivers. Drivers recruited in the experiment were monitored for their speed, acceleration and following distance while they drove the experiment car on typical urban road in good weather conditions. After acquiring the trajectory and related data, aggregate analyses on the separation point of free driving and car-following , speed versus following distance, acceleration versus relative motion and model calibration were performed to investigate the heterogeneity of drivers' behaviors across the professional and regular driver groups. Finally, traffic simulation based on the SUMO software package was performed to asses the impact of 3 effects of driver behavior parameters' variations and combinations on traffic flow efficiency and safety measures.

Aggregate analyses suggest a difference in the separation point of free driving and car-following across the two driver groups. The results for model calibration suggest drivers have different desired speed and maximum deceleration rate. The simulation results indicate desired speed changes the shape of speed flow fundamental diagram in the free flow area. Higher desired speed increases the absolute value of time average inverse Time-to-Collision (abbreviated as $|ITTC|/t$), which means less safe. The increase of maximum deceleration rate makes it harder to reach the maximum capacity on density flow fundamental diagram. When the proportion of professional driver (with lower desired speed and higher maximum deceleration rate) increases, under same flow rate the maximum value of $|ITTC|$ also increases, leading to a less safe state. However, there seem to be an optimal mixing rate of driver with different maximum deceleration rate where the $|ITTC|/t$ is minimal.

In conclusion, both desired speed and maximum deceleration rate has impact on traffic flow efficiency and safety measures. And the main factor is maximum deceleration rate as its effects dominate the combined effects. Current evidences suggest there is a non-negligible effect of driver behavior characteristics on traffic flow.

Keywords: driver behavior, traffic flow, driver heterogeneity, desired speed, deceleration rate

目 录

摘要	III
Abstract	V
目录	VII
第一章 绪论	1
1.1 研究的背景和意义	1
1.2 国内外研究概况	1
1.2.1 驾驶人行为特性研究	2
1.2.2 驾驶行为建模	2
1.2.3 驾驶人行为与交通流关系研究	3
1.2.4 国内外研究总结	4
1.3 研究内容和论文框架	4
1.3.1 论文依托	4
1.3.2 研究思路和技术路线图	4
1.3.3 研究内容	4
1.4 论文框架	5
1.5 本章小结	6
第二章 驾驶人行为特性的含义	7
2.1 驾驶人行为在出行行为层次中的位置	7
2.2 驾驶人行为的过程	8
2.3 跟驰行为特性	8
2.3.1 跟驰行为特性参数	8
2.3.2 跟驰行为的一般模型	10
2.4 变道行为特性	12
2.4.1 变道行为特性参数	12
2.4.2 变道行为的一般模型	13
2.5 驾驶人行为的差异性	16
2.6 本文关注的驾驶人行为特性	16
2.6.1 速度 - 跟驰距离特性	16
2.6.2 加速度 - 相对运动关系特性	16
2.7 本章小结	17
第三章 驾驶人行为特性实验	19
3.1 实验设计	19

3.1.1 硬件组成设备	19
3.1.2 数据采集软件	22
3.2 实验与数据采集	23
3.2.1 实验对象	23
3.2.2 实验路线	23
3.2.3 实验条件	23
3.2.4 实验过程	23
3.3 本章小结	24
第四章 驾驶人行为特性的差异性分析	25
4.1 数据处理	25
4.1.1 数据基本情况	25
4.1.2 数据处理	26
4.2 跟驰行为特性的集计分析	29
4.2.1 自由行驶与跟驰的临界点	30
4.2.2 稳定状态下跟驰距离与速度的关系	31
4.2.3 加速度与车辆相互运动的关系	32
4.2.4 集计分析小结	34
4.3 跟驰模型参数标定	34
4.3.1 标定方法框架	34
4.3.2 跟驰模型	35
4.3.3 目标函数	35
4.3.4 优化算法与搜索范围	36
4.3.5 轨迹数据与标定结果	36
4.3.6 所得估计参数的可靠程度	36
4.3.7 Bootstrap 与置信区间估计	37
4.4 本章小结	41
第五章 驾驶人行为特性对交通流影响	43
5.1 研究方法	43
5.1.1 模拟软件 SUMO 简介	43
5.1.2 模拟研究的有效性	44
5.1.3 模拟场景	44
5.1.4 评价指标	45
5.2 三相交通流理论简介	46
5.2.1 三个相位	46
5.2.2 相位转换	46
5.2.3 无数个通行能力和 J 线的含义	47
5.3 驾驶人行为特性对交通流效率性的影响	48
5.3.1 期望速度影响因素	48
5.3.2 最大减速度影响因素	50
5.3.3 混合影响因素	53
5.4 驾驶人行为特性对交通流安全性的影响	56
5.4.1 期望速度影响因素	56

5.4.2 最大减速度影响因素	57
5.4.3 混合影响因素	58
5.5 本章小结	60
第六章 结论与展望	61
6.1 主要成果和结论	61
6.1.1 研究方法	61
6.1.2 关于驾驶人行为特性的发现	61
6.1.3 驾驶人行为特性对交通流的影响	61
6.2 研究展望	62
致谢	63
参考文献	65
附录 A 受调查驾驶人基本情况	71
作者简介	73

第一章 绪论

1.1 研究的背景和意义

车辆的行驶是由驾驶人操纵有关机构实现的，驾驶人不仅是道路交通系统的信息处理者和决策者，也是道路交通系统的调节者和控制者，是道路交通系统中最活跃的要素。车辆的行驶状态是驾驶人所采取的驾驶行为的作用结果，而驾驶行为是在一定的外部环境下，驾驶人生理、心理和操作技能等驾驶特性相互作用的综合体现。不同驾驶人的生理状况和心理素质不同、驾驶操作技能也有差异，因此驾驶行为存在差异。不同驾驶人表现出不同的驾驶行为，同一名驾驶人在不同的外部环境和自身状态下的驾驶行为也不同。驾驶人行为特性具体的外在表现主要包括，在动态交通条件下，驾驶人的反应时间，速度选择，加速度选择，跟驰距离选择，变道决策与间隙接受等一系列特性。

长期以来，我国机动车为各种企事业单位所有，机动车驾驶人均为主专业驾驶人，专业驾驶人的驾驶技能熟练程度、驾驶特性等方面差异都较小。随着大量小汽车进入家庭，产生了大量的非专业驾驶人，非专业驾驶人在生理、心理以及驾驶操作技能等方面与专业驾驶人都存在明显的差异。而在传统的道路交通规划、设计与交通管理的研究和工程设计中，从宏观上假设驾驶人的驾驶特性相似和受同一普遍规律影响。这种假设没有体现驾驶人操作活动在复杂环境下的不确定性和不一致性，没有反映同一驾驶人在不同环境下驾驶行为特性的差异，没有反映大量驾驶人驾驶特性的微观差异对宏观交通流的影响，没有反映出驾驶人不同的驾驶特性对道路交通流的影响作用关系，这与现今真实的交通状况存在显著的差异。在此基础上进行的道路交通规划、设计与交通管理难以符合真实的交通现象，降低了交通规划、设计方案与交通管理措施的合理性与实施效果，同时也增加了交通事故的潜在危险性。

通过研究驾驶人行为特性对交通流的影响，将有助于对驾驶特性、驾驶行为与道路交通流的影响关系有更加深刻的理解；将有助于从人的因素的角度分析各种复杂交通流现象的形成和演化过程；将有助于确定影响道路交通安全的人的因素，为进一步探究改善交通流状况和提高交通安全性提供有力的理论支持；也可以为智能车辆、驾驶辅助支持系统等设备的研制提供理论支持。总之，研究驾驶人行为特性对道路交通流的影响，对提高道路交通系统运输效率和交通安全性具有重要意义，对我国今后的道路交通规划、设计、管理、控制也有重要的理论和应用价值。

1.2 国内外研究概况

与本文议题相关的国内外相关研究主要集中在三个方面，1) 驾驶人行为特性研究，2) 驾驶人与驾驶行为建模，3) 驾驶人行为与交通流关系研究。

1.2.1 驾驶人行为特性研究

对驾驶人行为特性研究可以分为两种思路，一种主要考察了不同道路条件下的驾驶人行为特性，另一种则考察了不同属性驾驶人的行为特性，这些研究主要通过实际观测的手段对驾驶人的行为特性进行了比较和分析，为理解驾驶人的行为特性提供了经验基础。

1.2.1.1 不同道路条件下的驾驶人行为特性

对不同道路条件下的驾驶人行为特性的研究，主要针对某一特定的道路条件下的驾驶人行为进行了分析。Kou (1997) 研究了高速公路汇入匝道处驾驶人的跟驰和汇入时的间隙接受行为。研究发现驾驶人匝道处的汇入行为，并不与任何单一的参数如汇入速度、主线流量、跟车间距与时距、速度差等显著相关，而各参数的组合能更好的解释驾驶人的驾驶行为^[1]。Heaslip (2007) 在跟驰模型中加入了驾驶人对车道改变的熟悉程度、适应性和驾驶人的进攻性，研究了施工区域驾驶人的驾驶行为^[2]。Xu (2007) 研究了环形交叉口驾驶人的间隙接受行为，研究从视频数据中提取事件信息，用最大似然法和 Raff 法对临界车头时距和跟车时距进行了估计并进行了比较。研究发现交织流量和环道车速与临界车头时距和跟车时距呈现负相关性^[3]。Dalia Said (2008) 根据高速公路不同路段的实测数据，从驾驶人劳动强度的角度分析了驾驶人的加减速和方向盘操作行为，并与高速公路线形设计的安全性进行了关联性分析^[4]。

1.2.1.2 不同属性驾驶人的行为特性

不同属性驾驶人的行为特性的研究，通过对不同性别、驾驶经验等属性的驾驶人行为的观测，比较分析了不同驾驶人行为的差异性。孔繁森 (2004) 依据 Kuipers 的定性仿真方法对熟练驾驶人和刚学会开车的驾驶人，在具有不同曲率半径和路面情况的一段道路上所做出的车速选择做了定性推理，给出了两类不同驾驶人驾车行为的定性状态描绘图和相应的车速曲线变化图^[5]。Yang (2007) 通过对加拿大城市道路、乡村道路和高速公路的实测数据对自由流和非自由条件下的驾驶人的速度选择和加减速行为进行了研究，并对不同行为的驾驶人进行了分类。研究发现对于不同的道路驾驶人的速度行为差异明显，并与交通流条件高度相关；驾驶人一般会选择高于限速值不超过 10% 的速度；根据驾驶人群体可分为进攻型、防守型、和一般型三类，进攻型倾向于选择高于限速的车速，防守型相反，一般型选择不超过限速太多的车速；驾驶人的加减速选择在非自由流条件下变化更大；在自由流条件下，驾驶人的加减速依赖于瞬时速度。在中低速情况下，加减速率随速度增加而减小。而在高速条件下较为稳定；不同类型驾驶人的加减速选择差异明显，进攻型驾驶人加减速率较大而防守型相反^[6]。张开冉 (2008) 对新驾驶人的反应时间进行测试，与一定样本量的对照组相应指标作比较，结果表明信息复杂度较大时，两组间反应时差异较为显著^[7]。王晶 (2008) 基于驾驶人性别对城市快速路跟驰模型进行了研究^[8]。徐上 (2009) 在实际道路交通环境下进行了驾驶人跟驰行为实验，测试了驾驶人的跟驰距离、跟驰时距等操作特征参数。研究发现：性别因素、驾驶人精神状态因素、驾龄和累计行驶里程对跟驰时距有较为显著的影响；男性驾驶人跟驰时距较女性驾驶人平均低约 0.7s；驾龄和累计行驶里程越长，跟驰时距相应越小，但并非是线性减少关系^[9]。

1.2.2 驾驶行为建模

对驾驶行为建模主要可分为微观交通流模型和基于驾驶人认知与决策的模型。微观交通流模型主要从交通流理论中的基本图出发，通过对车辆相对位置关系和运动的描述对驾驶人行为建模。而基于驾驶人认知与决策的模型，对驾驶过程中的复杂的认知和决策行为进行了研究。

1.2.2.1 微观交通流模型

微观交通流模型将驾驶行为分为跟驰和变道两种行为，主要有影响力的跟驰模型包括 GM 模型，期望参数模型，优化速度模型，Gipps 模型，IDM 模型等。各模型所假设驾驶人的跟驰目的不尽相同，但均主要围绕速度差，跟驰距离等变量建立模型。

变道模型一般将变道分为强制变道和非强制变道，变道行为分为两个阶段，车道选择和间隙接受。具体的跟驰模型和变道模型将在第二章展开描述。

目前的微观交通流模型将跟驰和变道单独研究，认为两者相互独立，而这并不符合实际，Toledo 等（2007）提出了一个整合加速、车道变换、间隙接受等各种驾驶行为模型的框架，研究了驾驶人变道过程中的加速行为^[10]。

1.2.2.2 基于驾驶人认知与决策的模型

随着对驾驶人行为研究的深入，越来越多的研究对驾驶人的认知、决策等活动进行了考虑，并将其纳入到驾驶人的建模当中。Oliver 和 Pentland（2000）在测试车数据基础上利用组对隐马尔科夫模型对驾驶人行为进行了识别和预测^[11]。邱凌云（2005）基于 Agent 理论对驾驶人进行建模，研究了 Agent 的跟驰、换道和挤占道等行为^[12]。Dario D.Salvucci（2006）基于 ACT-R 的认知模型对驾驶人的转向操作、跟驰、变道准备和变道行为、注视分布进行了研究^[13]。杨新月（2006）基于认知活动链对驾驶人行为进行了建模和仿真^[14]。许骏（2008）将驾驶人 - 汽车看作统一的人机系统，建立了基于 Markov 决策过程的驾驶人行为模型，并对所建模型进行了计算机仿真^[15]。王晓原（2008）基于决策树对驾驶行为决策机制进行了研究^[16]。Samer Hani Hamdar（2009）对驾驶人行为进行建模，把驾驶行为作为一种随机的冒险行为进行研究，从而将人的认知过程纳入到微观交通流模型中，并且发现驾驶人预期、驾驶人行为差异和驾驶经验长短对其行为有显著影响^[17]。

由于考虑驾驶人认知决策的模型的复杂性，这些模型还需要更多的证据来证明其有效性和优越性。

1.2.3 驾驶人行为与交通流关系研究

由于驾驶人的行为特性很难大范围调查，研究驾驶人行为与交通流关系，目前主要使用基于模型模拟的方法。而所研究的主要驾驶行为特性是驾驶人的跟驰行为特性。

雷丽等（2003）在一维交通流元胞自动机 NaSch 模型的基础上，优先考虑驾驶员的不确定性敏感预期行为，将随机延迟过程放在确定性减速之前，从而建立一种新的一维元胞自动机交通流模型，研究发现敏感驾驶因素对车流的作用很大，随着敏感驾驶车辆的增多，道路容量随之提高^[18]。葛红霞等（2005）研究发现当考虑快车和慢车的混合交通流时，即使少量的慢车也会导致交通流量大幅度下降^[19]。李启朗（2006）在单车道元胞自动机交通流 NS 模型基础上，通过引入不同的刹车概率来反映不同驾驶人的驾驶特性，并在周期边界条件下，对由激进驾驶车辆和谨慎驾驶车辆构成的混合交通流进行模拟。结果表明，在有谨慎驾驶车辆构成的交通流的临界密度以前，混合交通流的流量完全由谨慎驾驶人的特性决定^[20]。Farzaneh 和 Rakha（2006）分析了商用的交通流模拟软件中的稳态跟驰模型，并将跟驰模型分为两类，一类假设驾驶人的期望速度不随流量变化，另一类驾驶人的期望速度随流量变化即 INTEGRATION 中使用的 Van Aerde 跟驰模型。Farzaneh 和 Rakha 对驾驶人假设不同的期望速度，研究了速度变化对于稳态交通流的影响，发现速度变化对于通行能力所对应的最佳车速有显著的影响^[21]。ZHU 等（2007）建立了一个包括不同驾驶人概率的元胞自动机模型，分析了不同驾驶人混合对交通流的影响^[22]。Zhu 和 Dai（2008）研究发现当驾驶人检测车头距的反应延误增加时，交通流稳定区域减小，驾驶人检测车头距的反应延误在交通拥堵转换中扮演重要的角

色^[23]。Ossen (2008) 区分并研究了驾驶人之间差异和驾驶人内部差异对交通流的影响，研究发现驾驶人之间差异对基本图的形状产生影响，而驾驶人自身行为差异导致密度 - 速度平面上在水平轴上散落，导致基本图不再是一条线而成为一个平面。其研究还表明驾驶人的差异程度影响车队的稳定，差异程度低的车队会放大引导车的动态变化，而差异程度高的车队则会平滑引导车的动态变化。并且引导车的动态变化如何传播海域车队组成的顺序有关。而驾驶人的差异性对交通流稳定性的影响与对车队的结果类似^[24]。祝会兵 (2008) 研究发现：当道路上有一些比较谨慎的司机时，随机减速概率就大，道路流量明显下降；没有事故车瓶颈和其它瓶颈，慢车对交通流特性有很大的影响；司机的敏感性越差，反应延迟时间越长，越容易产生交通阻塞^[25]。Hamdar (2009) 对驾驶人行为进行建模，把驾驶行为作为一种随机的冒险行为进行研究，通过模拟实验发现器模型中影响密度 - 流量基本图的三个主要参数是对碰撞的权重，速度的不确定参数和驾驶人最大的提前预计时间，其他的影响因素还有驾驶人群体是否存在差异，以及驾驶人的反应时间。模拟实验发现驾驶人群体的差异性增加了基本图上点的分散程度，表明驾驶人差异性增加了交通流的不稳定性。而反应时间的增加造成了基本图上点的分散程度的增加和震得下移，意味着反应时间的增加造成了通行能力的下降和交通流的不稳定性^[17]。Kesting 等 (2010) 使用 IDM 跟驰模型通过模拟研究了，ACC 控制车辆的比例对与通行能力的影响，结果表明每增加 1% 的 ACC 车辆，通行能力增加 0.3%^[26]。

1.2.4 国内外研究总结

目前国内外关于驾驶人行为对交通流影响的研究已取得不少成果，但是还主要存在两点问题。其一，目前使用基于模型模拟的方法研究驾驶行为特性对交通流的影响，主要通过改变模型中的参数或使用不同参数模型进行混合，而所假设改变的参数在实际中是否会出现所假设的变化，目前还没有充分地研究。其二，目前所研究对交通流的影响还主要局限在交通流的效率性方面，较少涉及交通流的安全性。

1.3 研究内容和论文框架

1.3.1 论文依托

本论文依托于国家自然科学基金项目：“驾驶人员驾驶特性对道路交通流的影响机理”(50708019)。

1.3.2 研究思路和技术路线图

针对本文的研究背景，在假设驾驶经验对驾驶人行为有影响的前提下，并且在现有研究的基础上，通过对实际观测数据的分析研究，挖掘驾驶人行为特性的差异。通过交通流的微观模拟研究驾驶人行为特性对交通流效率性和安全性的影响。

本文技术路线图如图 1.1。

1.3.3 研究内容

根据研究思路，本文的主要研究内容如下：

(1) 驾驶人驾驶行为特性主要参数和交通流参数采集

针对本文研究背景，基于驾驶经验对驾驶行为产生影响的假设，以专业和非专业驾驶人为研究

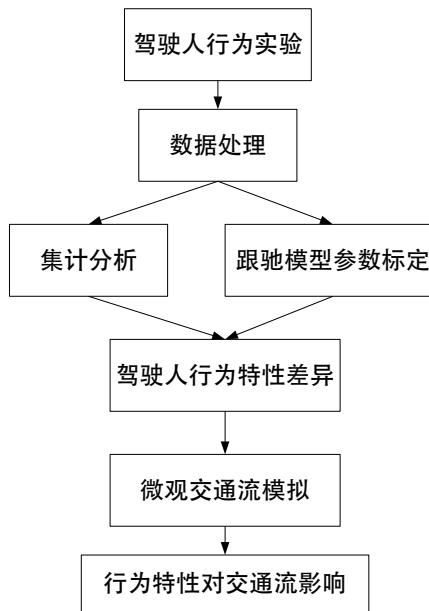


图 1.1 技术路线图

对象，调查其性别、年龄、驾龄、行驶里程等基本信息。选择典型的城市道路路段，在良好天气条件下，采集实际交通流状态下驾驶人的跟车速度、跟车间距、加速度、等驾驶行为的主要参数。

(2) 驾驶人行为特性分析

根据实验所得的测试车轨迹数据与其邻近车辆的相对速度和相对位置的时间序列数据，分析驾驶人在其动态变化的驾驶环境中的速度选择，加速度选择，跟驰距离选择等特性。通过对数据的累计分析以及跟驰模型的参数标定，分析并比较驾驶过程中的不同驾驶人行为的异同。

(3) 驾驶人行为特性对交通流影响分析

应用交通仿真程序，针对不同情况分别进行模拟研究：通过对驾驶人模型参数以及不同类型驾驶人混合比例的调整，研究驾驶人行为特性微观差异对于路段交通流宏观的效率和安全特性的影响。

1.4 论文框架

本文共分六章，本文的组织框架如下：

第一章，绪论，首先论述本文的选题背景及意义，然后介绍国内外关于驾驶行为特性及其对交通流影响的研究现状，接着介绍本文的研究思路，最后介绍本文的主要研究内容。

第二章，驾驶人行为特性及其对交通流影响的含义，阐述本文的研究对象和范围，介绍了表征驾驶人行为特性以及交通流状态的参数和主要有影响力的跟驰和变道模型，论述了驾驶人行为特性差异性的含义。

第三章，驾驶人行为特性实验，介绍了本文数据来源所使用的实验方法和实验过程。

第四章，驾驶人行为特性的差异性分析，通过对实验所获取数据的处理，通过累计分析和跟驰模型的参数标定，分析驾驶人行为特性的差异性。

第五章，驾驶人行为特性对交通流影响分析，使用微观交通流模拟软件，针对不同影响因素进

行模拟仿真，分析并阐述驾驶人行为特性对交通流效率性和安全性参数的影响以及可能的解释。

第六章，结论和展望，总结本文主要结论和存在问题，指出今后进一步研究的方向。

1.5 本章小结

本章叙述了论文研究的背景和意义，总结了国内外驾驶人行为特性及其对交通流影响相关研究的已有成果和不足，提出了本研究的主要内容与技术路线。

第二章 驾驶人行为特性的含义

2.1 驾驶人行为在出行行为层次中的位置

根据 Hranac 等 (2004) 的 NGSIM 核心算法评估报告^[27], 完整的出行行为可以划分为 5 个层次如图 2.1。

1. 出行前计划: 出行者在出行前制定的计划, 如是否出行、出发时间、目的地、路径等。
2. 途中策略: 出行前计划制定后, 出行者在途中可以选择按照原计划出行, 或者对计划进行修改, 比如改变目的地, 改变路径或者是停车选择等。出行前计划和途中策略的用时一般超过 30s。
3. 路径执行: 这一层次的出行行为的时间在 5s 至 30s 之间, 在执行路径时, 驾驶人根据一系列子目标执行战术性的操作, 例如保持理想的车速, 避开大车, 预先换到合适的车道等。这一层次的行为会形成低层次的战术性计划组合。
4. 驾驶操作: 这一层次所需时间一般在 5s 以内, 这一层次的行为包括, 变换车道, 变道的间隙接受, 加减速等。
5. 车辆控制: 这一层次的行为只需很短的时间, 包括转动方向盘, 踩加速踏板等。

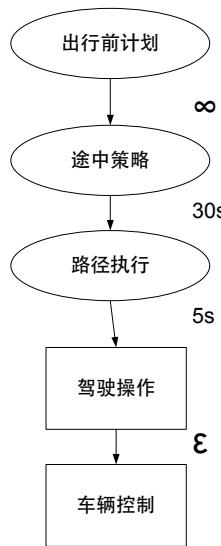


图 2.1 出行行为层次图^[27]

本文所指的驾驶人行为指的是层次 4, 即驾驶操作这一层次, 这也是大多数驾驶人行为模型所研究的层次。

2.2 驾驶人行为的过程

驾驶人行为可以划分为三个不断交替的过程，感知与信息收集，驾驶决策和对车辆的操控。感知与信息收集过程中，驾驶人主要依靠视觉采集相关的信息，这些信息来源于周围车辆和自身车辆。其中驾驶人只对部分信息变量敏感，包括速度，加速度，跟驰距离，相对速度，以及这些变量的某些函数（如时间间隔）。驾驶人收集到信息后通过采样与整合对这些信息进行解释，这种解释依靠驾驶人的对于车辆动态特性的理解以及其积累的驾驶经验。通过对信息解释的整合处理，最终形成驾驶决策。驾驶决策形成后，驾驶人通过对车辆机件的操作，对车辆的动态施加控制。

而本文所研究的驾驶人行为特性是指驾驶人通过操控车辆，使得车辆所表现出的一系列特性，而不具体研究驾驶人操控动作。其中驾驶过程框图如图 2.2

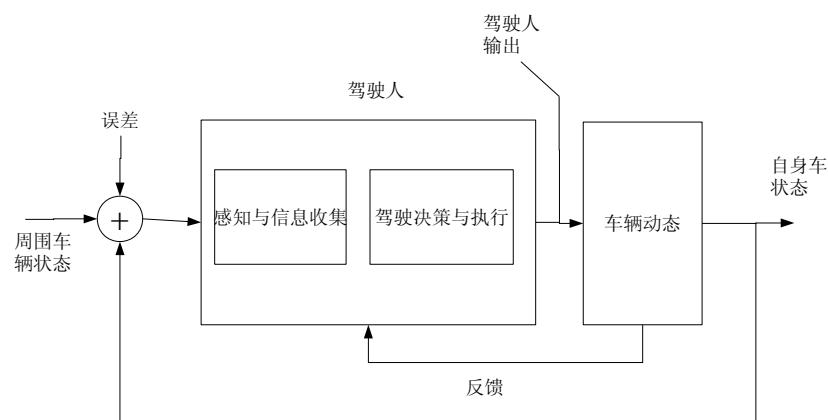


图 2.2 驾驶过程框图

驾驶人行为又可以分为跟驰行为和变道行为，跟驰行为是指驾驶人控制车辆跟随前方车辆保持一定距离，一定速度行驶的行为，这也是驾驶人最常面对的驾驶任务。变道行为是指，驾驶人暂时脱离跟驰状态，为了超车、转向或者提升驾驶条件而变换车道的行为。

两种行为事实上存在紧密联系，但是现阶段研究中仍然分别对这两种行为独立地进行分析，这种两者相对独立的假设便于开展研究，并且有利于交通流模拟系统的实现。本章中将对驾驶人的跟驰和变道行为特性的含义分别进行阐述。

2.3 跟驰行为特性

2.3.1 跟驰行为特性参数

描述微观的驾驶人跟驰行为时，对于每一个人车单元 DVU (driver-vehicle-unit)（也就是外在所表现出来的车辆，下文不再对此进行区分）有若干的特性参数来反映驾驶人的行为，这些参数包括两类，一类是可以直接测量或经由简单计算所得的变量，直接测量的变量包括车辆的即时速度，即时加速度，相对速度和跟驰距离。由直接测量变量经过计算得出的变量，包括跟车对的时间间隔。第二类是不可直接或很难测得也不可经由简单计算得出的变量，这些变量也反映了驾驶人行为的重要特征，因无法直接测量，需要根据前一类变量通过估计的方法得出合理的近似值，包括驾驶人的期望速度，期望跟驰距离，反应时间，期望时间间隔。

2.3.1.1 速度

车辆速度是 v 是跟驰过程中最为基本的变量，速度为车辆单位时间内的位移，在水平面上包括沿道路轴向和横向的速度分量。在跟驰过程中，车辆的沿道路纵向速度为主要影响跟驰车辆对相互作用的因素，而在正常的跟驰过程中车辆的沿道路横向速度相对轴向很小，因此在数量上，车辆速度与车辆沿道路轴向速度几乎总是非常相近。若以道路上一点作为起点，将车辆前保险杠点的沿道路方向的位移 X 看作是时间的函数，则速度为沿道路方向的位移的一阶导数，即 $v = \dot{X}$ 。

2.3.1.2 加速度

加速度与速度类似的包括沿道路纵向和横向的上分量，加速度是速度的一阶导数，是位移的二阶导数，即 $a = \ddot{v} = \ddot{X}$ 。按照加速度可将车辆的运行状态分为三类， $a > 0$ 时为加速状态， $a < 0$ 时为减速状态， $a = 0$ 时为巡航状态，驾驶人通过控制油门踏板和减速踏板的开合度改变车辆的加速度。

2.3.1.3 相对速度

相对速度为跟车对的速度差，为引导车辆速度值减去跟驰车辆速度值。以 v_{n-1} 表示引导车辆速度，以 v_n 表示跟驰车辆速度，则相对速度 $v_r = v_{n-1} - v_n$ 。一般认为相对速度是跟驰过程中驾驶人接受的主要刺激，驾驶人根据前后车辆的速度差相应的调整自身车辆的行驶状态。

2.3.1.4 跟驰距离与车头间距

车头间距是跟车对车头之间的距离 $\Delta X_n = X_{n-1} - X_n$ 。跟驰距离则指车头间距减去前车车身的长度 l_{n-1} ，即 $D_n = \Delta X_n - l_{n-1} = X_{n-1} - X_n - l_{n-1}$ 。跟车实验中一般容易测得的是跟车距离，一般认为当跟驰距离大于或等于最坏条件下的安全距离能保证不发生追尾事故，其中最坏条件下的安全距离是指前车 t 时刻瞬时停止的情况下，跟驰车辆从 t 时刻开始从反应到制动直至完全停下所运动的距离。而跟驰模型中则更多的使用车头间距，平均的车头间距反映了交通流的密度情况。

2.3.1.5 时间间隔与车头时距

车头时距为跟驰车辆车头 t 时刻在速度不变的情况下到达 t 时刻前车车头位置所需要的时间， $h_t = \frac{X_{n-1}-X_n}{v_n}$ ，平均车头时距反映了交通流的流量情况。时间间隔为跟驰车辆车头 t 时刻在速度不变的情况下到达 t 时刻前车后保险杠位置所需要的时间， $g_t = \frac{X_{n-1}-X_n-l_{n-1}}{v_n}$ ，时间间隔体现了驾驶人出于安全性考虑而保留的一定的可用于驾驶操作的余地。

2.3.1.6 反应时间

反应时间是驾驶人从外界条件发生改变的一刻开始到其控制自身车辆使其运动发生相应改变所需要的时间，此处反应时间指人车单元即车辆的总反应时间 t_l ，包括驾驶人的感知时间 t_p ，反应操作时间 t_r 和车辆机械延迟时间 t_m ，即 $t_l = t_p + t_r + t_m$ 。

2.3.1.7 期望参数

考虑期望参数即打破了驾驶人跟驰过程是完全反应式行为的假设，期望参数考虑了驾驶人的主观愿望，也就是说驾驶人在跟驰过程中会期望达到理想的跟驰状态，并在受限制的条件下对跟驰行为进行相应的调整。理想的跟驰状态由期望参数体现，具体期望参数主要有期望速度、期望车头间距和期望时间间隔等。不同的期望参数有其特定的含义，一般意义上驾驶人所期望的跟车行驶状态要满足驾驶人对于效率性，安全性等方面的需求。

2.3.2 跟驰行为的一般模型

跟驰模型对驾驶人的跟驰行为的目标作出各种假设而简历数学模型。在众多的跟驰模型中影响较为广泛的有如下几类。

2.3.2.1 刺激反应模型

刺激反应模型假设跟驰中驾驶人通过视觉感知与前车的距离以及前车后部面积在视野中的大小变化来判断与前车接近或是离去及其快慢程度，通过接受这一刺激并作出判断，实施操纵从而达到安全而紧密地跟随前车行驶。刺激反应模型的基本形式为， $\text{反应}(t + \Delta t) = \text{敏感度} \times \text{刺激}(t)$ 。其中最为典型的刺激反应模型是 Chandler 等 (1958), Gaziz 等 (1959, 1961) 于 20 世纪在美国通用汽车公司研究实验室开发的一系列模型^[28-30]。

其中 Gaziz 等 (1961) 给出了最一般形式的非线性 GM 模型^[30]。非线性 GM 模型基于如下假设：在时刻 $t + \Delta t$ 跟驰车的反应依赖于跟驰车对刺激的敏感度和引导车所给的刺激强度，刺激强度以引导车与跟驰车之间的相对速度、距离的形式给出，跟驰车的反应通过加速度测得，敏感特性描绘出单位刺激的反应， Δt 为反应时间。GM 模型的一般形式如下式：

$$\ddot{X}_{n+1}(t + \Delta t) = \frac{\alpha_{l,m} [\dot{X}_{n+1}(t + \Delta t)]^m}{[X_n(t) - X_{n+1}(t)]^l} \cdot [\dot{X}_n(t) - \dot{X}_{n+1}(t)], \quad (2.1)$$

式中：

m — 对速度 $\dot{X}_{n+1}(t + \Delta t)$ 的敏感性参数

l — 对车头间距 $X_n(t) - X_{n+1}(t)$ 的敏感性参数

$\alpha_{l,m}$ — 常数

2.3.2.2 期望参数模型

期望参数模型针对 GM 模型中速度差为零时跟驰距离可能很小的不合理情况，考虑了驾驶人的主观愿望，假设驾驶人在跟驰过程中会期望达到理想的跟驰状态，理想跟驰状态的参数主要有车速，车头间距和车头时距。

Helly 模型，Helly(1961) 提出驾驶人的反应不仅与相对速度有关，还与期望车头间距与实际车头间距差值有关^[31]。其模型如下：

$$a_n(t) = a_1 \Delta V(t - \tau_n) + a_2 [\Delta X_n(t - \tau_n) - D_n(t - \tau_n)], \quad (2.2)$$

其中 D_n 是期望车头间距，其大小受到本车速度的影响。Helly 模型指出并解决了 GM 模型中如果两车以相同速度行驶则任何车头间距均可接受的这一缺陷。

Koshi 等 (1992) 提出了这一模型的非线性版本^[32]。他们的模型中期望车头间距给出如下：

$$D_n(t - \tau_n) = L_{n-1} + V_n(t - \tau_n)T, \quad (2.3)$$

其中 L_{n-1} 为引导车长度， T 是假定为恒定的期望车头时距。

Addison 和 Low(1998) 以及 Low 和 Addison(1998) 将车头间距项加入 GM 模型提出了新的模型^[33, 34]。

$$a_n(t) = a_1 \frac{V_n(t)^m \Delta V_n(t - \tau_n)}{\Delta X_n(t - \tau_n)^l} + a_2 (\Delta X_n(t - \tau_n) - D_n(t - \tau_n))^3, \quad (2.4)$$

其期望车头间距的形式给出如下：

$$D_n(t - \tau) = \lambda V_n(t - \tau), \quad (2.5)$$

2.3.2.3 优化速度模型

优化速度模型假设驾驶人在跟驰过程中根据车辆运动关系有使用最优速度的趋势。

Newell(1961) 研究了速度与车头间距的关系，其假设为车速为车头间距的非线性函数^[35]：

$$V_n(t) = G_n[\Delta X_n(t - \tau)], \quad (2.6)$$

函数 G_n 的形式体现了驾驶人的跟驰行为，Newell(1961) 研究了 G_n 的具体形式^[35]：

$$V_n(t) = V_{max} \left[1 - \exp \left(\frac{-\lambda}{V_{max}} (\Delta X_n(t - \tau) + D) \right) \right], \quad (2.7)$$

其中 V_{max} , λ 和 D 为参数。 V_{max} 和 λ 可以相应的理解为最高车速和最小车头间距。

Bando 等 (1995) 假设驾驶人施加的加速度跟其实际车辆速度与期望速度的差值成正比，而期望速度由与前车间距决定^[36]。模型忽略了反应时间，其形式如下：

$$a_n(t) = \alpha [DV_n(t) - V_n(t)], \quad (2.8)$$

其中 $DV_n(t)$ 为期望车速，其函数给出如下，但未给出理论或实际观测的证明。

$$DV_n(t) = \tanh(\Delta X_n(t) - 2) + \tanh(2), \quad (2.9)$$

2.3.2.4 安全距离模型

Gipps (1981)^[37] 提出了基于安全跟驰距离的模型，其模型假设驾驶人与前车保持一定的安全从而保证在前车以最大减速度减速的条件下，仍能够在最小停车间距的距离停车。其跟驰状态下的速度形式如下：

$$v_n^{con}(t + T_r) = b^{max} * \left(\frac{T_r}{2} + \theta \right) + \sqrt{(b^{max})^2 * \left(\frac{T_r}{2} + \theta \right)^2 - b^{max} * [2 * (\Delta X_{n-1,n}(t) - d) - v_n(t) * T_r - \frac{v_{n-1}(t)^2}{b_{n-1}^{max}}]} \quad (2.10)$$

其中，

b^{max} = 最大减速度

d = 停车时的最小车头间距

b_{n-1}^{max} = 驾驶人估计的前车最大减速度

T_r = 反应时间

θ = 安全反应时间

其自由行驶状态下的速度如下：

$$v_n^{free}(t + T_r) = v_n(t) + 2.5 * a^{max} * T_r \left(1 - \frac{v_n(t)}{v^*} \right) * \sqrt{0.025 + \frac{v_n(t)}{v^*}} \quad (2.11)$$

则驾驶人车辆最终的速度为两者的最小值：

$$v_n(t + T_r) = \min(v_n^{con}(t + T_r), v_n^{free}(t + T_r)) \quad (2.12)$$

2.3.2.5 IDM 模型

Treiber 等 (2000)^[38] 和 Treiber 和 Helbing(2003)^[39] 假设加速度受到期望速度和期望跟驰距离的影响提出了 IDM 模型，其形式如下：

$$a_n(t) = a_{max} \left[1 - \left(\frac{V_n(t)}{DV_n(t)} \right)^4 - \left(\frac{D_n(t)}{\Delta X_n(t)} \right)^2 \right], \quad (2.13)$$

其中 a_{max} 为车辆的最大舒适加速度。 V_n 为实际车速， DV 为期望速度， D_n 为期望跟驰距离， ΔX_n 为实际跟驰距离。

驾驶人车辆的加速度由两个部分组成，其趋向自由行驶部分的加速度为：

$$a_{max} \left[1 - \left(\frac{V_n(t)}{DV_n(t)} \right)^4 \right], \quad (2.14)$$

受前车影响部分的加速度为：

$$-a_{max} \left[\left(\frac{D_n(t)}{\Delta X_n(t)} \right)^2 \right], \quad (2.15)$$

当实际的跟驰距离小于期望跟驰距离时，此项成为加速度的主要部分。

其期望车头间距给出如下：

$$D_n(t) = \Delta X_n^* + V_n(t)T_n(t) + \frac{V_n(t)\Delta V_n(t)}{2\sqrt{a_{max}b_{max}}}, \quad (2.16)$$

其中 ΔX_n^* 为停车间距， T_n 为期望车头时距，当距离较小时 ΔX_n^* 占期望跟驰距离的主要部分， T_n 期望车头时距体现了驾驶人对安全跟驰距离的一种期望。 b_{max} 为最大舒适减速度。在大多数情况下将减速度的绝对值限制在其以下。

2.3.2.6 各类跟驰模型中对驾驶人行为假设的总结

各类跟驰模型中对驾驶人的跟驰行为的假设不尽相同，一部分模型将加速度作为驱动驾驶人行为演化的变量：刺激反应模型假设驾驶人的加速度与速度差和车头间距有关，速度差越大、车头间距越小则加速度越大。期望参数模型在刺激反应模型基础上更多地考虑了期望车头间距对驾驶人加速度的影响。IDM 模型假设驾驶人的加速度由趋向自由行驶部分和受到前车影响部分组成。

另一部分模型将速度作为驱动驾驶人行为演化的变量：优化速度模型则假设驾驶人根据车头间距来选择合适的最优速度。安全距离模型与优化速度模型类似地假设驾驶人根据车头间距来选择合适的最优速度，而其最优速度的目标为保证不与前车发生碰撞。

从各类跟驰模型对于驾驶人跟驰行为的假设可以看出，驾驶人跟驰过程中影响驾驶人行为的主要包括速度与跟驰距离或车头间距的关系，以及加速度与车辆间相对运动的关系。

2.4 变道行为特性

2.4.1 变道行为特性参数

描述微观的驾驶人变道行为时，对于每一个人车单元 DVU 同样有若干的特性参数来反映驾驶人的行为，与跟驰行为不同的是，变道行为更多时候是驾驶人主动的行为，这也意味着描述变道行为的变量有更多的不可测量的隐藏变量。

2.4.1.1 车道属性

车道属性包括车道平均速度，车道平均密度，和车道车辆组成等。这些变量是基于效应的模型中驾驶人所选择车道的效用主要的解释变量。驾驶人根据自身的观察，一般会对其周围局部的车道属性形成一定的判断。因此车道属性只在一定的时空范围内影响驾驶人的选择车道的效用。

2.4.1.2 邻车速度

驾驶人车辆周围的车辆的速度对于驾驶人的变道行为存在影响，首先周围车辆的速度影响驾驶人的车道选择，其次在驾驶人的目标车道上的前后车车速与自身车辆的车速差影响驾驶人的最小接受间隙。

2.4.1.3 间隙

间隙是指驾驶人在变道间隙接受过程中在与其相邻的目标车道上假设其变道后，前向和后向的净间距 G_f 和 G_b ，其示意图如图 2.3。当目标车道上的车辆与驾驶人车辆在沿道路方向存在重叠时，间隙可为负值。间隙接受示意图如图 2.3

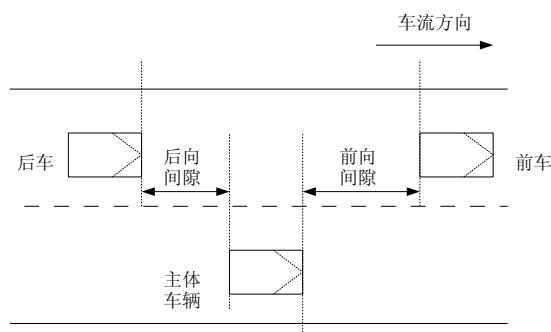


图 2.3 间隙接受示意图

2.4.1.4 最小接受间隙

最小接受间隙是指在驾驶人的间隙接受过程中，驾驶人最小的可接受间隙，当实际间隙大于最小接受间隙时则接受间隙进行变道，否则就拒绝间隙保持原车道行驶。

2.4.2 变道行为的一般模型

变道行为可分为两个阶段，第一阶段选择车道，如果选择车道非现行车道则进行第二阶段执行变道。两个阶段对应的模型分别为目标车道模型和间隙接受模型。

2.4.2.1 车道选择模型

Gipps(1986)最早提出了用于微观仿真的变道模型^[40]。其模型考虑变道的必要性，可能性和安全性。驾驶人行为考虑两条最基本的原则：保持理想的速度和保持在正确的车道上从而进行计划的转向操作。

Halati 等 (1997) 在 CORSIM 中提出了 MLC 和 DLC 的区别^[41]。按照迫切程度，变道行为可分为 MLC (mandatory lane change) 强制变道和 DLC (discretionary lane change) 选择变道，MLC 强制变道指驾驶人按照行驶计划的路径必须选择某条车道时的变道行为（例如左转必须使用左转车道或下

游拥堵), DLC 选择变道则指驾驶人为了追求更为有利的驾驶条件而相对自由进行选择的变道行为。

Yang 和 Koutsopoulos(1996) 在 MITSIM 中实现了一个基于规则的变道模型^[42]。模型中同样区分了 MLC 和 DLC。驾驶人当需要按计划行驶至下一个连接, 绕开下游的拥堵, 遵守车道使用规则时进行 MLC 强制变道, 其目标冲突通过概率的效用最大化模型解决。而当驾驶人认为引导车速度低于期望速度时考虑进行选择变道 DLC, 随后驾驶人寻求机会变换到相邻的车道以提高车速。其与以往模型不同之处在于车道选择基于随机的效用模型, 体现了驾驶人权衡不同因素 (比如速度优势, 重车, 汇如交通等) 对车道选择的影响。

Ahmed 等 (1996) 和 Ahmed(1999) 提出了一个基于效用的包含 MLC 和 DLC 的通用的模型框架^[43, 44]。变道过程分三步: 决策进行变道, 目标车道选择和间隙接受。当不存在 MLC 条件或驾驶人决定不执行 MLC 时, 进而分两步考虑 DLC。首先驾驶人检查自身车道的驾驶条件是否达到满意的程度, 这取决于自身车速与期望车速的差值。如果驾驶人对自身车道的驾驶条件不满意, 则驾驶人比较自身车道与相邻车道的驾驶条件, 其中相邻车道的效用受到车道上的前向和后向车辆车速的影响。

Ben-Akiva 等 (2006) 总结了驾驶人一般的车道选择的逻辑^[45]。驾驶人一般的变道逻辑图如图 2.4

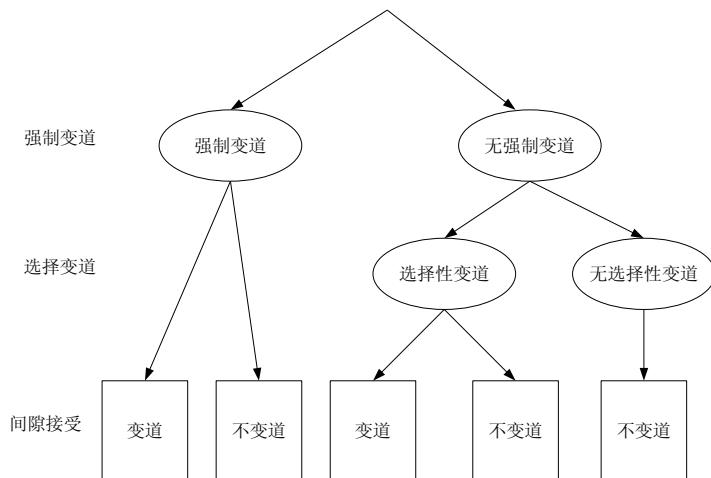


图 2.4 变道逻辑图

Toledo 等 (2005) 提出了明确目标车道的车道选择模型, 该模型基于效用理论并综合考虑了 MLC 和 DLC, 驾驶人选择效用最高的车道作为目标车道。目标车道的选择集包含所有驾驶人可能使用的车道, 各条车道的效用函数形式如下:

$$U_{int}^{TL} = \beta_i^{TL} X_{int}^{TL} + \alpha_i^{TL} v_n + e_{int}^{TL} \quad \forall i \in \{\text{lane1}, \text{lane2}, \text{lane3}, \text{lane4}, \dots\}, \quad (2.17)$$

其中

U_{int}^{TL} – 驾驶人 n 在时刻 t 选择车道 i 为目标车道的效用

X_{int}^{TL} – 影响车道 i 效用的解释变量构成的向量

β_i^{TL} – 与 X_{int}^{TL} 相对应的参数

v_n – 与驾驶人个体特征相关的解释变量构成的向量

α_i^{TL} – 与 v_n 相对应的参数

e_{int}^{TL} – 影响驾驶人 n 在时刻 t 选择 i 车道效用的随机项

模型中目标车道的效用受到车道属性（如密度，速度），以及与路径计划相关变量（如到下一个路径中指定车道的距离）的影响。除此之外，驾驶人车辆所处的车道位置也对车道选择产生影响，并在模型中通过需要变道的次数来反映。

2.4.2.2 间隙接受模型

Gipps(1986) 假定驾驶人分别考虑前向间隙和后向间隙，两者必须同时满足相应条件，驾驶人才接受间隙。对于间隙的评价是通过计算，本车变道后跟随前车以及购车跟随本车所需要采取的减速值，如果所需减速值小于一定阈值则接受间隙^[40]。

Kita(1993) 对于高速公路匝道汇入处的间隙接受行为用 Logit 模型进行了估计，并发现重要的影响因素包括，间隙的长度，汇入车辆速度与主线速度差值以及到加速车道末端的距离^[46]。

Ahmed 等 (1996) 假设前向和后向间隙都必须被接受，在其模型中假设最小接受间隙符合对数正态分布，Ahmed 等给出了最小间隙的形式，并可以保证其值非负^[43]。其形式如下：

$$\ln(G_{nt}^{gd,cr}) = \beta^g + \alpha^g v_n + \epsilon_{nt}^{gd} \quad g \in \{\text{lead, lag}\}, d \in \{\text{right, left}\} \quad (2.18)$$

其中

$G_{nt}^{gd,cr}$ – 朝着方向 d 变道的最小接受间隙

X_{nt}^{gd} – 解释变量构成的向量

β^g – 与 X_{nt}^{gd} 相对应的参数

ϵ_{nt}^{gd} – 随机项， $\epsilon_{nt}^{gd} \sim N(0, \sigma_g^2)$

α^g – 与驾驶人个体特征有关的随机量 v_n 相对应的参数

假设驾驶人比较真实的前后向间隙与相宜的最小接受间隙，当真实的间隙大于最小接受间隙则接受，否则就拒绝。

Kesting 等 (2007) 提出了基于加速度效用的变道模型即 MOBIL 模型^[47]。该模型假设变道行为是驾驶人对变道带来的期望自身加速度增加的正面效应以及变道后后车减速的负面效应的权衡。例如，变换到一条空的车道，可以获得更高的加速度并且不妨碍其他车辆，这种情况下的变道是有利的。模型中给出了效用函数的形式来估计变道所带来的正面效应和负面效应。MOBIL 模型中的一个重要参数为“礼貌系数”，“礼貌系数”用来体现驾驶人不同的自私程度。但是 MOBIL 模型只考虑驾驶人每一瞬间是否变道的选择，并且只适用于 DLC 情况。

2.5 驾驶人行为的差异性

本文的一个重要假设就是驾驶人行为的差异性，正是由于驾驶人行为的差异性，驾驶人组成情况的改变才可能导致对交通流的影响。

驾驶人行为的差异性有两种含义，一是不同驾驶人之间的行为差异性，二是驾驶人在不同交通条件，生心理条件下的行为差异性。

不同驾驶人之间行为的差异可以由驾驶人驾驶操作的目标、习惯、熟练程度的差异等多种因素造成。而驾驶人自身，在交通条件，生心理条件发生改变时会改变自己的驾驶行为而作出适应性的调整，最典型的现象是驾驶人加减速的不对称性。本文中将基于驾驶人行为差异性的假设，同时考虑驾驶人行为的差异性的两种含义进行研究。

2.6 本文关注的驾驶人行为特性

本文主要关注驾驶人的跟驰行为特性，主要的原因是驾驶人的变道行为量化的观测十分困难，并且很难区分强制变道和非强制变道，虽然变道行为对交通流可能产生显著的影响，由于研究条件的限制本文不再对驾驶人的变道行为特性作更多的讨论。

本文的目的在于研究驾驶人行为特性对交通流的影响，除了研究单独的行为特性参数，将着重关注可能对交通流状态产生显著影响的跟驰行为特性。直观上，速度 - 跟驰距离特性对于交通流效率有较大影响，而加速度 - 相对速度特性对于交通流稳定性和安全性有较大影响。这两方面是驾驶人跟驰过程中最为基本的任务，速度和加速度的选择既有本质的区别又存在联系。速度的选择体现了跟驰过程中驾驶人一种相对稳定的需求（例如对于安全性和执行出行计划的需要），加速度的选择则体现了驾驶人跟驰过程中对于驾驶环境的适应以及驾驶状态的改变；而两方面的联系在于，速度 - 跟驰距离状态的改变需要通过驾驶人施加操作来实现，也就是说速度的改变通过加速度来实现。本文将在实际测量数据的基础上，对驾驶人一般的跟驰行为特性进行研究，以期加深对驾驶人跟驰行为特性的认识。

2.6.1 速度 - 跟驰距离特性

速度 - 跟驰距离选择反应了驾驶人跟驰行为特性中相对稳定的部分，一方面，驾驶人根据出行计划，道路条件，交通流条件来选择车速，当车辆的加速度小于一定的阈值时则认为处于稳定的跟驰状态，此时驾驶人根据其选择的车速会与引导车保持一定的安全跟驰距离。另一方面，由于驾驶人对于外界条件的估计存在误差以及对于自身车辆的控制存在不稳定性，车辆的行驶状态会与驾驶人期望的状态出现偏差，驾驶人需要在一定的跟驰距离下调整自身相应的车速。因此驾驶人的速度 - 跟驰距离选择是一种组合性的选择。跟驰距离与车头间距相差的部分为引导车的车身长度，跟驰距离与车头间距两者虽不存在固定不变的算术关系，但是两者的相关性是客观存在的。跟驰模型中出于简便的需要一般使用车头间距，而不是实际中更容易测的跟驰距离。

2.6.2 加速度 - 相对运动关系特性

加速度 - 相对速度选择反应了驾驶人跟驰行为特性中相对随机的部分。按照刺激反应模型的假设，驾驶人在一定的相对速度下选择相应的合适的加速度。现有的研究中，Herman 等 (1958) 讨论了基于刺激反应模型的交通流局部和渐进稳定性^[48]。结果表明驾驶人的敏感性参数与反应时间的乘

积决定了单车道交通流的局部和渐进稳定性。因此驾驶人的加速度 - 相对速度选择特性对于交通流存在不可忽略的影响。驾驶人的加速度行为的一个重要特征是加速和减速的不对称性，Forbes(1963)发现驾驶人加速过程中的反应要比减速过程中的慢^[49]。Foote(1965)跟踪观测了隧道中的车队，发现在同样车速下减速车队具有更高的流量^[50]。Newell(1965)解释了驾驶人加减速的不对称性，认为如果前车加速跟随车会空出一段距离再做决定^[51]。

2.7 本章小结

本章进一步明确了本文的研究对象和范围，介绍了表征驾驶人行为特性以及交通流状态的参数和主要有影响力的跟驰和变道模型，总结了跟驰模型中对驾驶人行为的一般假设。本章简要阐述了驾驶人行为特性差异性的驾驶人之间差异和驾驶人自身差异的两方面含义，叙述了本文主要关注的驾驶人跟驰行为特性中的速度 - 跟驰距离特性和加速度 - 相对运动关系特性。

第三章 驾驶人行为特性实验

本文的驾驶人行为特性实验目的在于，调查和记录专业驾驶人与非专业驾驶人在城市路段行车时，采取的跟驰驾驶行为。为分析驾驶人行为特性的异同及其对城市路段交通流的影响提供数据。实验拟获取的数据主要包括实验驾驶人的速度、加速度、以及实验车辆与其前方行驶车辆的相互位置与运动关系。

3.1 实验设计

为了获得实验驾驶人的速度、加速度、以及实验车辆与其前方行驶车辆的相互位置与运动关系，本文使用主动模式（指测量对象为实验车驾驶人）的跟驰实验系统进行实际交通环境下的测试。实验系统的软硬件组成描述如下。

3.1.1 硬件组成设备

如表 3.1，实验设备包括汽车一辆（手动档）、车载激光测速测距仪一体化系统一套（车载激光测距仪、GPS 接收器一个、处理机一台）、摄像机一台、笔记本电脑一台。主要硬件设备如图 3.1

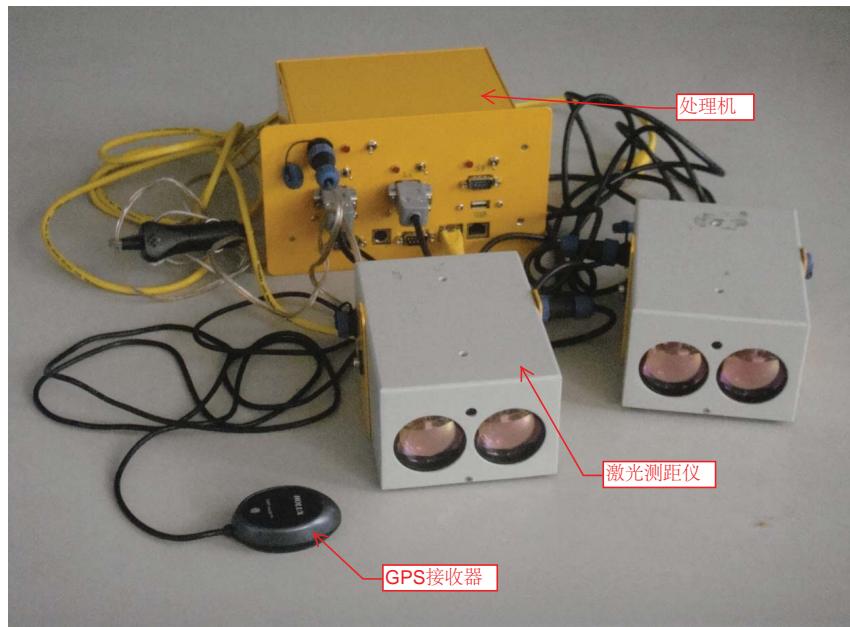


图 3.1 主要硬件设备图

其中，汽车选取目前道路比较有代表性的车型，北京现代的 sonata 领翔 2.0 GL MT，其基本参数如表 3.2.

表 3.1 硬件设备列表

序号	名称	构成	用途
1	汽车	手动档汽车	实验用车
2	车载激光测速测距仪	车载激光测距仪、GPS、处理机	获取实时车速、车间距
3	摄像机	摄像机	实验场景记录
4	笔记本电脑	Thinkpad T40 笔记本	现场控制终端

表 3.2 实验车基本参数

指标	数值
最高车速 (Km/h)	204
0-100km/n 加速时间 (s)	9.9
车重 (kg)	1492
排量 (L)	2.0
功率 (Kw/rpm)	121/6200
最大扭矩 (N·m/rpm)	197/4600

3.1.1.1 激光测距基本原理

激光测距仪是指利用射向目标的激光脉冲或连续波激光束测量目标距离的距离测量仪。它由三大部分组成：激光发射机、激光接收机、电源。激光发射机由脉冲激光器、发射光学系统、取样器以及瞄准光学系统组成，其作用是将高峰值功率的激光脉冲射向目标。激光接收机由接受光学系统、光电探测器和放大器、接收电路组成，其作用是接收从目标漫反射回来的激光脉冲回波并计算和显示目标距离。电源用于设备的供电。激光测距仪的工作原理是利用脉冲激光器向目标发射单次激光脉冲，计数器测量激光脉冲到达目标并由目标返回到接收机的往返时间，由此运算目标的距离。计算公式为：

$$D = ct/2 \quad (3.1)$$

其中 D 是与目标的距离， c 为光速， t 是光往返时间。

激光测距仪的工作过程是：首先瞄准目标，然后接通激光电源，启动激光器，通过发射光学系统，向瞄准的目标发射激光脉冲信号。同时，采样器采集发射信号，作为计数器开门的脉冲信号，启动计数器，钟频振荡器向计数器有效的输入钟频脉冲，由目标反射回来的激光回波经过大气传输，进入接收光学系统，作用在光电探测器上，转变为电脉冲信号，经过放大器放大，进入计数器，作为计算器的关门信号，计数器停止计数。计数器从开门到关门期间，所进入的钟频脉冲个数，经过运算得到目标距离。

3.1.1.2 GPS 卫星定位系统基本原理

GPS 系统由空间部分、地面监控部分和用户端三个部分组成。

(1) GPS 的空间部分：由 21 颗工作卫星和 3 颗备用卫星组成，24 颗卫星均匀覆盖在地球上空，可以保证地球上所有地点任意时刻都能同时看到至少 4 颗 GPS 卫星。

(2) GPS 的地面监控部分：地面监控设备的作用是监测和控制卫星上的各种设备是否正常工作，以及卫星是否一直沿着预定轨道运行；另一作用是保持各颗卫星处于同一时间标准——GPS 时间系统。GPS 地面监控系统包括一个主控站、三个注入站和五个监测站。

(3) GPS 的用户端：即是 GPS 的信号接收机，它能捕获卫星的信号，对所接收的 GPS 信号进行变换、放大和处理，实时地计算出测点的三维位置、速度和时间。

GPS 系统的基本原理是：太空中的卫星在任意时刻都有一个坐标值（星历为已知值），接收机所在位置为未知值，信息在传送过程中，所需耗费的时间，可经由比对卫星时钟与接收机内的时钟计算之，将此时间差值乘以电波传送速度（一般为光速），就可计算出卫星与接收机间的距离，如此就可依三角向量关系来列出一个相关的方程式，每接收到一颗卫星就可列出一个相关的方程式，因此收到至少三颗卫星信号，即可计算出经纬度坐标，收到四颗则加上高程值，五颗以上更可提高准确度。当接收机处于动态时，每一秒钟的坐标数据都在更新中，也就是说接收机会自动不断地接收卫星信号，并实时地计算其所在位置的坐标数据。系统再将获取的空间与时间的数据结合，计算出车辆的实时速度。

3.1.1.3 设备安装

车载激光测距仪固定在实验车辆挡风玻璃后面，中控台中央的位置，激光头向前放置，能够使激光照射到实验车辆前方的物体，其安装如图 3.2 所示；车载 GPS 固定在车辆中间的位置；处理机和笔记本电脑放置在车辆后排座位上；摄像机固定在实验车辆后排座位靠背的中间位置上，可以通过实验车辆挡风玻璃拍摄到前方的道路交通情况。



图 3.2 设备安装示意图

3.1.1.4 车载激光测距测速系统的工作流程

系统包括车载电源、GPS 接收器、激光测距系统、处理机及相关配套设施。其中车载电源为激光测距仪和处理机供电，GPS 接收器和激光测距仪连接于处理机上，处理机与笔记本电脑相连。数据经过处理机计算传送到笔记本电脑上显示并储存。

驾驶人驾驶实验车在道路上行驶时，车载 GPS 实时接收卫星信号获取车辆实时的经度与纬度，车载激光测距仪获取与前方物体的距离，车载 GPS 和车载激光测距仪分别将数据传输至处理机，经

过处理机运算处理后将各项数据传输到与处理机相连的笔记本电脑中显示并储存。系统工作流程如图 3.3 所示。

完整的实验系统示意图如图 3.4。

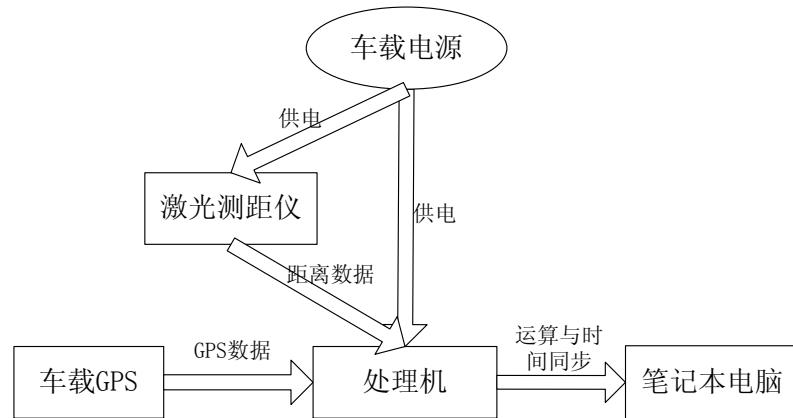


图 3.3 系统工作流程示意图

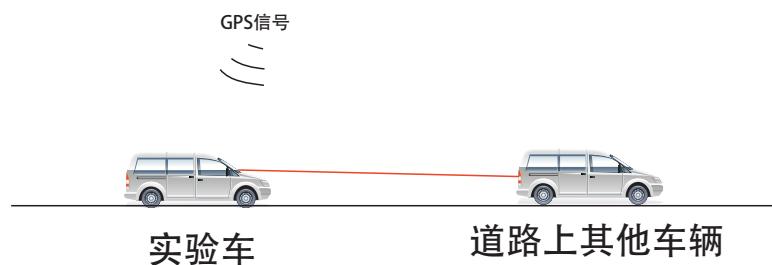


图 3.4 实验系统示意图（红色线条代表激光）

3.1.2 数据采集软件

数据采集软件主要起到变量实时运算和时间同步处理的功能。

通过实验仪器直接获取的数据只有实验车辆实时经纬度与前车和后车的实时距离，要得到所需要的实验车辆速度和加速度、前车速度、前后车相对速度（速度差）等数据，可以通过以下运算得到。GPS 定位仪输出的是 WGS-1984 经纬度坐标，在此坐标下计算行驶距离的公式为：

$$D = 2R \sin\left(\sqrt{\sin^2\left(\frac{l_1 - l_2}{2}\right) + \cos(l_1)\cos(l_2)\sin^2\left(\frac{w_1 - w_2}{2}\right)}\right) \quad (3.2)$$

其中 D (m) 为经纬度坐标点 (l_1, w_1) 和 (l_2, w_2) 之间的距离， R 为地球半径，取 6378137m 。设定 GPS 每秒钟返回一个数据，当前车辆的瞬时速度 (单位 m/s) 计算公式为： $v = D'$ 设 $\Delta t'$ 为记录前后两个坐标点的时间差，本车加速度 $a(\text{m/s}^2)$ 则通过本车速度计算得到，计算公式为：

$$a = \frac{v_1 - v_2}{\Delta t'} \quad (3.3)$$

其中 v_1, v_2 分别为相邻的两瞬时速度(单位 m/s), $\Delta t'$ 为两个瞬时速度的时间差(单位 s)。激光测距仪直接输出的是本车车头与前车车尾之间的间距, 前车与本车的相对速度(m/s)计算公式如下:

$$v_r = \frac{d_2 - d_1}{\Delta t''} \quad (3.4)$$

其中 d_1, d_2 为相邻两个车间距(单位 m), $\Delta t''$ 为两个相邻车间距对应的时间差(单位 s), 又 $v_r = v_f - v_b$, 其中 v_f 为前车速度(单位 s), v_b 为后车速度(单位 s), 故前车的速度为:

$$v_f = v_r + v_b \quad (3.5)$$

运算得到所关心变量以后, 时间同步处理通过 GPS 的校时功能, 将 GPS 轨迹点和其他变量对应地标上时间点并输出保存。

3.2 实验与数据采集

3.2.1 实验对象

实验对象分为专业驾驶人与非专业驾驶人。其中, 专业驾驶人主要选取长期从事驾驶工作, 或驾龄 7 年且累计行程 10 万公里以上的驾驶人; 非专业驾驶人主要选取非特定职业, 驾龄不足 7 年或累计行程不足 10 万公里的驾驶人。选取的专业驾驶人与非专业驾驶人都尽可能来自各行各业, 覆盖各年龄层, 最终的样本包括 10 名专业驾驶人和 16 名非专业驾驶人。

3.2.2 实验路线

实验路线的选取考虑了以下条件。首先本文不考虑非机动车的影响, 因此道路条件方面包含单向两车道城市道路与单向三车道城市道路, 且路段上开口较少, 有机非分隔带, 机动车行驶受非机动车和行人干扰较小, 路面情况良好; 其次为了获取较多的跟驰行为数据, 交通条件方面有足够的大的交通流量, 但是不至于造成长时间的拥堵, 道路上行驶的车型以小汽车为主。

经过实地调查, 本实验选取的实验路段为: 南京市龙蟠中路-瑞金路-御道街-中山东路一线。其中龙蟠中路为双向六车道; 瑞金路东西向为三车道, 西东向为两车道; 御道街靠近瑞金路一段为双向四车道, 靠近中山东路一段为双向六车道; 中山东路为双向四车道。该路段全天交通流量均较大且高高峰时流量相差不大, 平峰时段车流量满足要求, 高峰时段不造成长时间拥堵, 车辆跟驰特征明显, 比较符合实验要求。具体线路如图 3.5 所示。

3.2.3 实验条件

实验选择在天气良好、光线充足的条件下进行。所选取的时间段主要在车流量较大但不造成长时间拥堵的时候, 能够满足车辆跟驰的要求。经过调查发现, 实验路段上, 工作日与非工作的交通流量变化不大, 交通流量与高高峰时间段相对固定。最后根据所选取路段的交通流量以及高峰期的时间, 本论文实验时间定为 8: 00—11: 00 和 13: 00—18: 00。

3.2.4 实验过程

实验过程中, 在按照既定路线驾驶行车前, 向每个实验参与者说明实验的目的、设备及用途、既定的路线等, 并指示其放松并安装日常习惯驾驶。实验于 2010 年 9 月进行, 历时共 15 天。

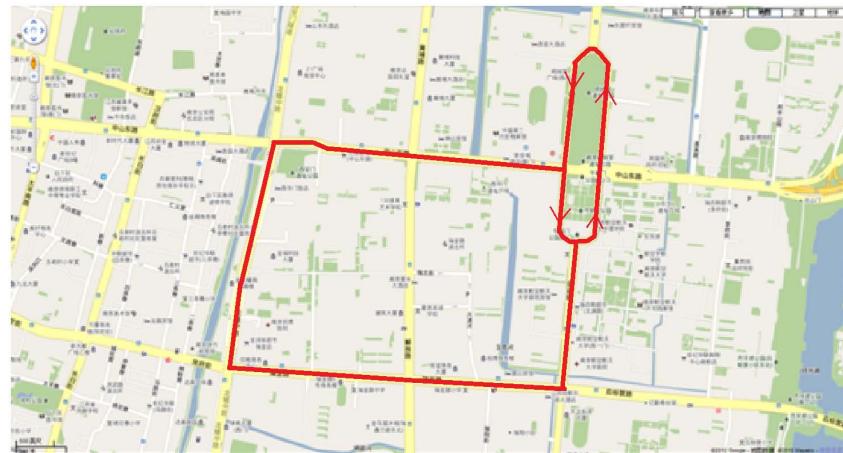


图 3.5 实验路线示意图

3.3 本章小结

本章首先介绍了本文获取数据所使用的实验方法，包括硬件组成，设备原理和数据采集软件。实验采取了车载激光测距仪和 GPS 实时测量记录实验车辆的跟车距离、速度、加速度、前后车相对速度等关键指标。本章还描述了实验驾驶人的选取，实验路线的选择与考虑。最后进行了实验条件的介绍并简要描述了实验过程。

第四章 驾驶人行为特性的差异性分析

本章的研究目的在于探究驾驶人行为特性，在专业与非专业驾驶人中是否存在差异，在哪些方面存在差异以及差异的程度有多大，为下一章研究驾驶人行为特性对交通流影响提供依据。本章首先将讨论所获取数据的基本情况，针对数据所存在的问题进行数据后处理。其次，对数据进行集计，分析两组受试驾驶人在跟驰行为中所表现出的特性。最后，使用测试数据对跟驰模型参数进行标定，并分析两组驾驶人参数分布的异同。

4.1 数据处理

4.1.1 数据基本情况

4.1.1.1 驾驶人构成

根据第三章对于驾驶人分类，区别专业与非专业驾驶人的主要因素为驾龄，总里程数。专业驾驶人主要选取长期从事驾驶工作，驾龄 7 年以上且累计行程 10 万公里以上的驾驶人；非专业驾驶人主要选取非特定职业，驾龄不足 7 年或累计行程不足 10 万公里的驾驶人。

实验驾驶人共 26 人，其中 10 人归为非专业驾驶人 16 人归为专业驾驶人，其基本情况如下，驾驶人的年龄分布如图 4.1，其中最大的群体为 20-25 岁。两组驾驶人的年龄分布箱图如图 4.2，其中专业驾驶人平均年龄为 43.4 岁，最低 33 岁，最高 53 岁；非专业驾驶人专业驾驶人平均年龄为 25 岁，最低 23 岁，最高 29 岁。

两组驾驶人的驾龄和累计行驶里程分布情况分别如图 4.3 和图 4.4，实验样本中，非专业组平均驾龄为 3.06 年，平均行驶里程为 2.01 万公里专业组平均驾龄为 12.6 年，平均行驶里程为 67.2 万公里。

可以看出非专业组和专业组驾驶人的驾龄和累计行驶里程存在明显的差异，但是驾驶人的驾龄、累计行驶里程和年龄似乎存在较大的相关性。

此外实验样本中的女性驾驶人较少仅有 3 名，占样本量 26 名的约 10%，3 名女性驾驶人均为非专业驾驶人。

4.1.1.2 数据的基本情况

通过实验获取共 60041s（约 16.6hr）的数据，就单个驾驶人而言最短的数据 741s，最长的数据 3623s。图 4.5，图 4.6 和图 4.7 分别给出了原始数据中测试车的跟驰距离、速度和加速度分布情况。由于城市路段交通情况的特点，跟驰距离主要集中在 20 米以内，峰值出现在 2 – 6m 之间。车速的分布，由于停车较多，速度为 0 的分布频次最多，而在 0 – 40km/h 的区间内分布比较平均，40 – 60km/h 分布逐渐减少，很少有超过 60km/h 的车速。实验车加速度的分布峰值出现在 $0m/s^2$ ，分布范围主要在 $[-2,2]m/s^2$ 的区间。总体上数据的基本情况符合实际测试的交通状况。

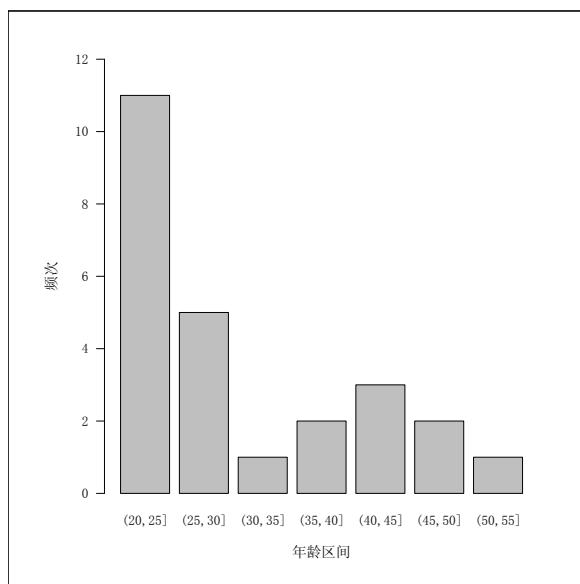


图 4.1 年龄分布柱状图

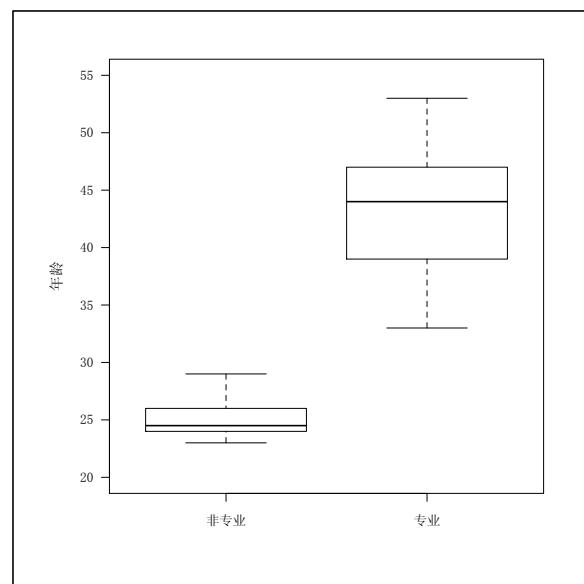


图 4.2 非专业与专业组年龄箱图

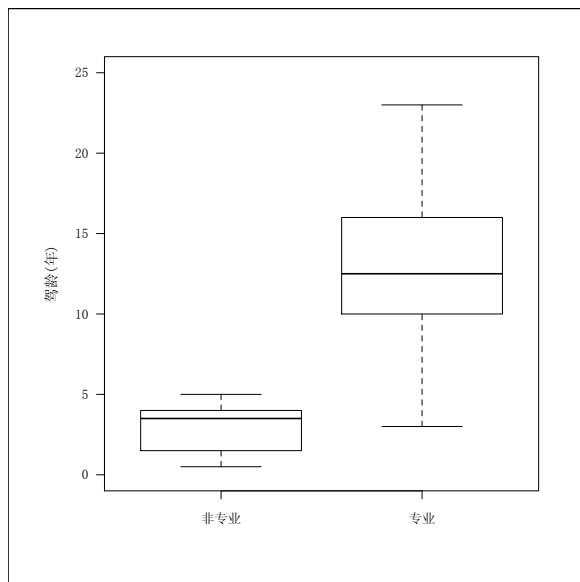


图 4.3 非专业与专业组驾龄箱图

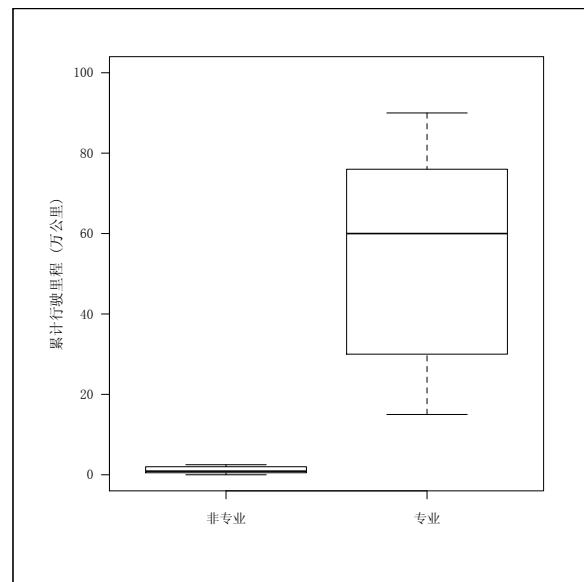


图 4.4 非专业与专业组累计里程箱图

4.1.2 数据处理

由于激光测距系统的固有特性，所测的原始数据中前车轨迹数据主要存在两方面的问题。其一，前车动态的数据不连续。激光测距测速仪安装于实验车上，在行驶过程中，受到前车尾部高度、反射率、车辆转向等因素的影响，其射出的光束并不能保证时刻得到有效的返回光束，因此也无法测出实验车与前车的相对动态关系。其二，所得数据存在随机误差（系统误差已通过试验设备的校准尽可能减小），随机误差理论上应符合正态分布，随机误差将使实验数据的分析发生偏差，Ossen (2008)^[24] 的实验表明，车辆轨迹的测量误差会对驾驶人行为参数的估计产生不可忽略的影响，因此有必要对数据进行后处理。对于车辆轨迹的后处理的最主要目的是得到对于真实轨迹的偏差尽可能小的估计。

目前研究中针对轨迹数据的处理主要有以下几种方法。

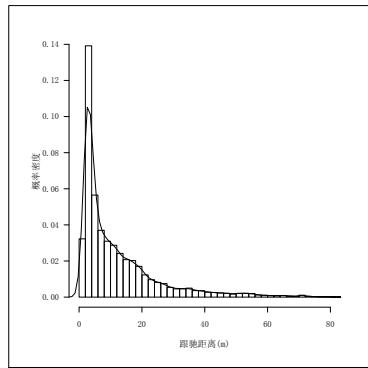


图 4.5 跟驰距离的核密度估计

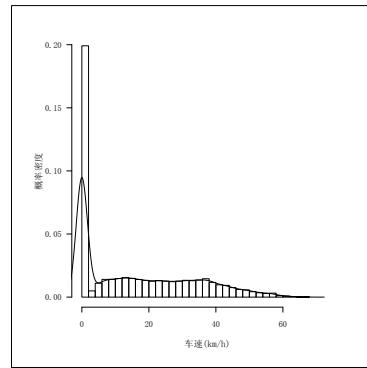


图 4.6 车速的核密度估计图

图

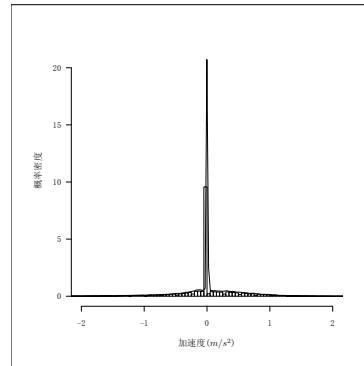


图 4.7 加速度的核密度估计图

1. 简单移动平均

最简单的轨迹数据后处理是简单移动平均, Thiemann 等^[52] 使用对称指数移动平均来平滑处理 NGSIM 的轨迹数据, 发现了误差在差分过程中的放大效应, 使得误差从位置, 速度, 加速度极大地向下传递, 并使用移动平均来抵消这一效应。移动平均通常需要进行敏感性分析来确定移动平均的窗口大小和权重函数, 从而使得既能够降低噪声又能保存原有信号中的高频部分。一般通过频谱分析来确定截断频率。

2. 卡尔曼滤波

Ervin, R. 等^[53] 使用卡尔曼滤波的方法对 SAVME 系统采集的轨迹数据进行了平滑处理, Punzo 等^[54] 使用类似的方法对 GPS 采集的轨迹数据进行了处理。卡尔曼滤波需要对车辆的运行模型进行假设, 而研究车辆的运行模型往往是采集轨迹数据的目的, 因此若本文使用卡尔曼滤波进行轨迹数据的处理存在逻辑上的矛盾。

3. 局部加权回归

Toledo 等^[55] 提出了使用局部加权回归的方法对轨迹数据进行处理的方法, 局部加权回归可以较好地使用多项式拟合高度非线性的函数, 可以用来处理轨迹数据和速度数据。Toledo 等^[55] 的研究表明局部加权回归结果对于参数选择, 测量误差和缺失测量值均是较为稳定的。

本文中根据所测数据的特性, 比较各种方法后选取局部加权回归的方法对轨迹数据进行处理, 并根据一定的原则通过筛选, 获取合理的数据。

4.1.2.1 局部加权回归

Cleveland^[56] 最早提出了局部加权回归的方法，局部加权回归在每一点使用数据的一个子集（一般选取以拟合点中心对称的一个“窗口”）通过低阶的多项式函数进行拟合，多项式系数的估计采用加权最小二乘法，对于靠近拟合点的数据给予较高的权重而远离拟合点的数据则反之，得出拟合函数后计算拟合点的数值。局部加权回归可以灵活的选取窗口大小和权重函数以适应不同的应用需求。

对前车数据应用局部加权回归时，需要进行 3 个参数的选择，分别是权重函数，多项式次数和窗口大小。

根据实际情况，本文处理中权重函数选取了 Tricube 核函数，

$$w(t_0, t) = (1 - u(t_0, t))^3 \quad (4.1)$$

$$u(t_0, t) = \frac{|t - t_0|}{d} \quad (4.2)$$

其中：

$w(t_0, t)$ = 中点为 t_0 时 t 点的权重

$u(t_0, t)$ = t 到 t_0 的规格化距离

$d = t_0$ 到窗口外最近一点的距离

其形状如图 4.8

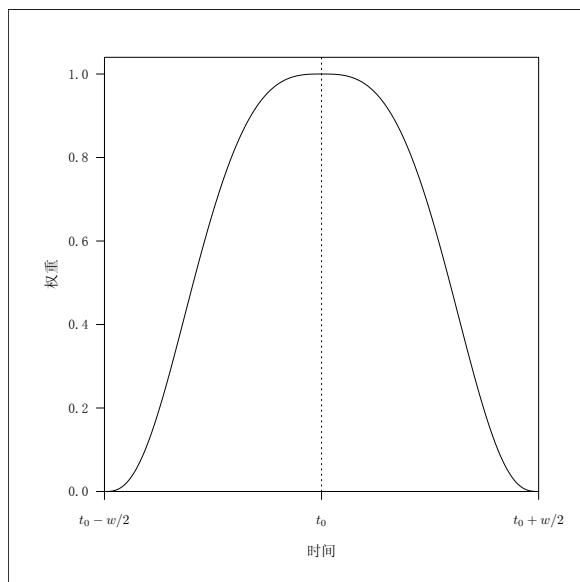


图 4.8 Tricube 核函数示意图

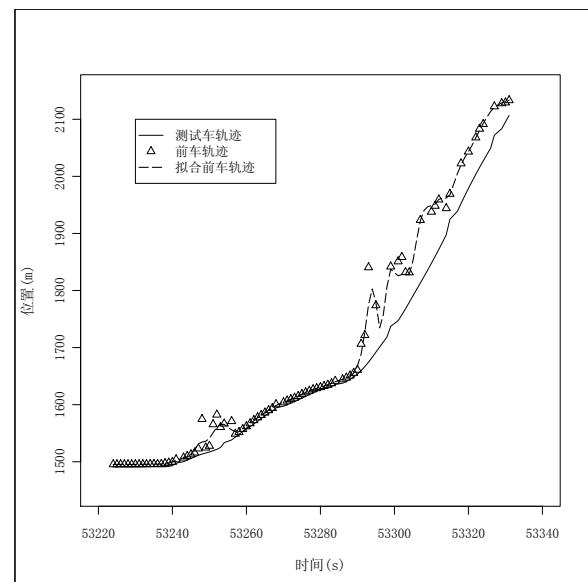


图 4.9 前车（引导车）轨迹数据局部回归示意
图

为了保证回归后所得数据的合理性，需要保证回归多项式次数至少为 3 次，从而当从轨迹数据求导获取速度和加速度数据时，速度和加速度不会退化为常数。而过高的次数会增加计算的复杂度，并且高次多项式需要更大的数据窗口进行拟合，因此本文中选取多项式次数为 3，窗口大小选择为 11 个数据点，一般会覆盖到 1s 的时间。

经过局部回归处理后的数据，还需要对数据进行筛选，合理的前车轨迹数据应符合以下两个条件，其一由于正常行驶中车辆不后退，因此轨迹数据应为非严格单调增函数；其二由于车辆运动的

宏观连续性，拟合数据与原始数据较大的差值往往表明原始数据中前车运动已经超过可能的物理极限，为无效数据，因此有效的局部回归数据应与原始数据较为吻合。其三前车数据应符合交通情况和物理极限，例如车速超过 60km/h 和加速度在 $[-5,10]\text{m/s}^2$ 之外的应为无效数据。

图 4.9 为对前车轨迹数据处理的样例，例如图中 53260s 到 53290s 的数据为回归拟合较好的数据，而 53300s 周围的数据由于出现车辆倒退为无效数据，需要排除在有效数据之外。

4.1.2.2 处理结果

经过数据处理与数据筛选后，60041s 的数据中共 24374s 大约 40.6% 的数据成为最终用于分析的数据。经过处理后的数据中实验车数据的跟驰距离，车速和加速度分布如图 4.10，图 4.11 和图 4.12

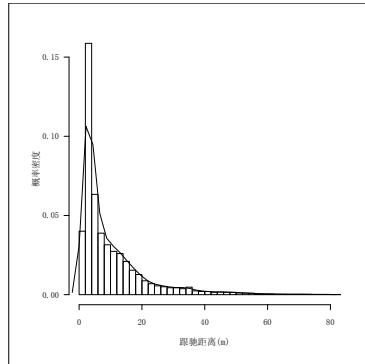


图 4.10 处理后跟驰距离概率核密度估计图

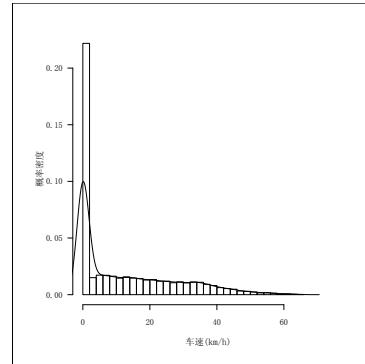


图 4.11 处理后速度概率核密度估计图

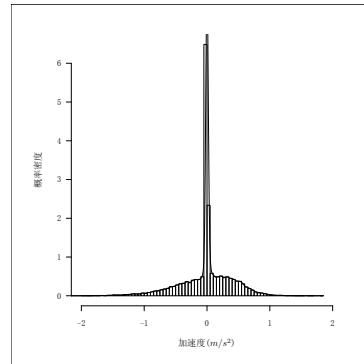


图 4.12 处理后加速度概率核密度估计图

处理后的数据参数分布，其形状对比图 4.5，图 4.6，图 4.7，可以看出数据处理并未对数据的固有特征造成显著的影响，因此可以认为数据处理未对原始数据进行有偏差的抽取。

4.2 跟驰行为特性的集计分析

本节通过对数据的集计，对专业与非专业驾驶人的行为特性进行初步的分析，从而研究专业与非专业驾驶人驾驶行为的异同。分析主要针对三个方面，一，自由流与跟驰的临界点；二，稳定状态下跟驰距离与速度的关系；三，加速度与车辆相互运动的关系。

4.2.1 自由行驶与跟驰的临界点

车辆的行驶可认为存在自由行驶和跟驰两种状态，自由行驶是指车辆在不受前车影响下的自由行驶。而跟驰情况下，车辆速度受到前车速度的影响。一般可以假设认为，前车对于驾驶人的影响大小与其时间或空间意义上的距离有关，距离越小则影响越大而距离越大则影响越小。自由行驶和跟驰的临界点是影响跟驰行为的重要因素，因此也是反映驾驶人行为特性的一个指标。

Vogel (2002)^[57] 提出了通过定点测量的车头时距和车速数据确定自由行驶与跟驰的临界点的方法，根据车头时距和车头间距对数据进行分组，其后计算每组数据内前后车速度的相关系数来代表前车对后车速度的影响程度。其数据表明当车头时距大于一定数值后，车速的相关系数出现突然的下降，通过假设临界点分别对假设的跟驰数据和自由行驶数据进行线性拟合试算，当两组数据的拟合的交点与分割点最为接近时则认为得到了自由行驶与跟驰的临界点。

本文中针对所获取的数据，基于 Vogel 的方法，使用时间间隔替换车头时距分别对专业和非专业驾驶人的数据进行了自由行驶与跟驰的临界点的确定。对于所有的数据，将时间间隔数据舍入到最近的秒数，例如时间间隔在 0.5 至 1.5 秒坐开右闭区间的归入到 1 秒的组别，在 1.5 至 2.5 秒坐开右闭区间的归入到 2 秒的组别，依此类推。对于超过 20.5 秒的数据由于数据量很少不能得到可靠的速度相关系数值，因此排除在考察数据之外。

对专业和非专业驾驶人，分别计算速度相关系数，并进行线性回归的试算，其结果如表 4.1，回归示意图如图 4.13 和图 4.14。

表 4.1 自由行驶与跟驰临界点结果表

	专业驾驶人	非专业驾驶人
临界点时间间隔	6.5s	11.5s
跟驰拟合 R 平方	0.9899	0.9925
自由行驶拟合 R 平方	0.3302	0.0892
交点	6.06s	11.34s
跟驰拟合方程	$y=-0.06526x+ 0.93158$	$y=-0.0679x+ 0.9996$
自由行驶拟合方程	$y=-0.02613x+ 0.69439$	$y=-0.00752x+ 0.31514$

结果显示，对于专业驾驶人 1s 的时间间隔其速度相关系数为 0.9，也就是说超过 80% 的泵车速度变化可以由前车的速度解释，到 6s 之前每增加 1s 的时间间隔，速度相关系数均显著下降。在 6s 与 12s 之间速度相关系数产生一些波动，总体上仍呈现下降趋势。超过 12s 后速度相关系数减小到 0.4 以下；对于非专业驾驶人，1s 的时间间隔其速度相关系数也约为 0.9，直到 12s 速度相关系数均显著下降，超过 12s 后速度相关系数减小到 0.1 以下。从专业与非专业自由行驶与跟驰临界点结果看，专业驾驶人的临界点为 6.5s，非专业驾驶人为 11.5s，这似乎意味着非专业更早的受到前车的影响而进入跟驰的状态，但是在 (6.5,11.5] 的时间间隔区间内，专业驾驶人的速度相关系数要大于非专业驾驶人的相应数值。将 (6.5,11.5] 的时间间隔区间内的数据选出，得到专业驾驶人 8159 组数据，非专业驾驶人 7245 组数据，计算前后车辆的速度差值，两组数据基本上呈正态分布。分别统计得到专业驾驶人速度差中位数为 0.3281m/s，标准差 4.357m/s；非专业驾驶人速度差中位数为 0.3677m/s，标准差 4.801m/s。通过 Levene 检验，专业组与非专业组的速度差方差存在统计意义的显著差别 ($P<0.01$)。以上结果表明在 (6.5,11.5] 的时间间隔区间内，驾驶人仍然有与前车保持速度一致的趋势，同时专业驾驶人的速度差分散程度要小于非专业驾驶人。综合所得结果可以推断，对于

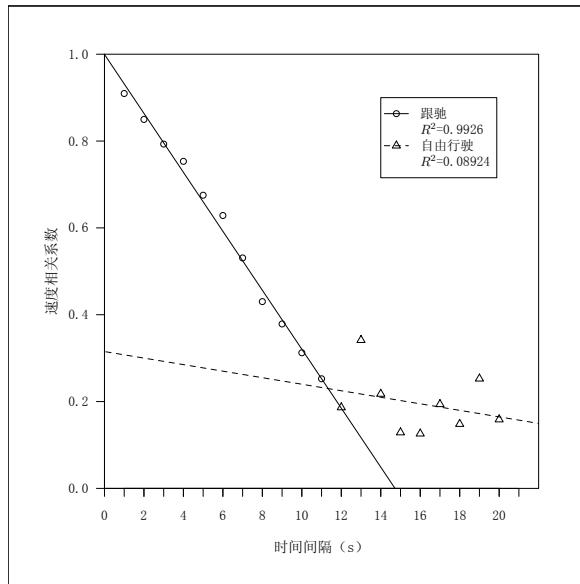


图 4.13 非专业驾驶人时间间隔 -速度相关系数图

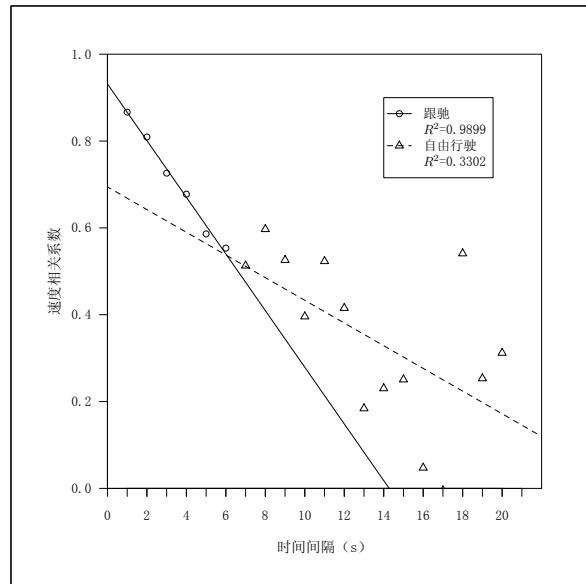


图 4.14 专业驾驶人时间间隔 -速度相关系数图

专业和非专业驾驶人在一定的时间间隔内，均受到前车速度影响，相比于非专业驾驶人专业驾驶人似乎能更好地将自身的车速与前车保持一致，尤其是在稍大的时间间隔区间。

4.2.2 稳定状态下跟驰距离与速度的关系

速度 -跟驰距离选择反应了驾驶人跟驰行为特性中相对稳定的部分，驾驶人根据出行计划、道路条件、交通流条件来选择车速，当车辆的加速度小于一定的阈值时则认为处于稳定的跟驰状态，此时驾驶人根据其选择的车速会与引导车保持一定的跟驰距离。

基于稳定状态下跟驰距离与速度有关的假设，将实验中所获取的数据加速度绝对值小于 $0.1m/s^2$ 的数据选出并分组集计：分别对专业组和非专业组驾驶人按照速度分组，计算每组相应的平均跟驰距离和平均速度，其关系如图 4.15。

由图 4.15 可以看出，整体上跟驰距离随车速的增加而增加，这符合一般认识。对平均车速和平均跟驰距离进行线性回归，得到回归方程。对于专业驾驶人 $d_1(m) = 1.557v_1(m/s) + 3.8652$ ，其 $R^2 = 0.3277$ 。对于非专业驾驶人 $d_2(m) = 1.830v_2(m/s) + 2.6901$ ，其 $R^2 = 0.4466$

通过设置虚变量可以检验（T 检验）专业组和非专业组的回归系数的差异是否显著。设置虚变量 PRO ，对专业驾驶人 $PRO = 1$ ，非专业驾驶人 $PRO = 0$ ，则通过回归：

$$d = h_1 \cdot PRO + h_2 \cdot v + h_3 \cdot PRO \cdot v + b \quad (4.3)$$

其中 h_1 为截距差， h_3 为斜率差。

得到表 4.2，结果表明两组线性回归的斜率与截距均无统计意义的显著差异 ($P = 0.05$) 水平下，不能拒绝 $h_1 = 0$ 或 $h_3 = 0$ 的假设）。因此此处集计分析的证据不能支持专业与非专业驾驶人的稳定状态下跟驰距离与速度关系特性存在显著差异。

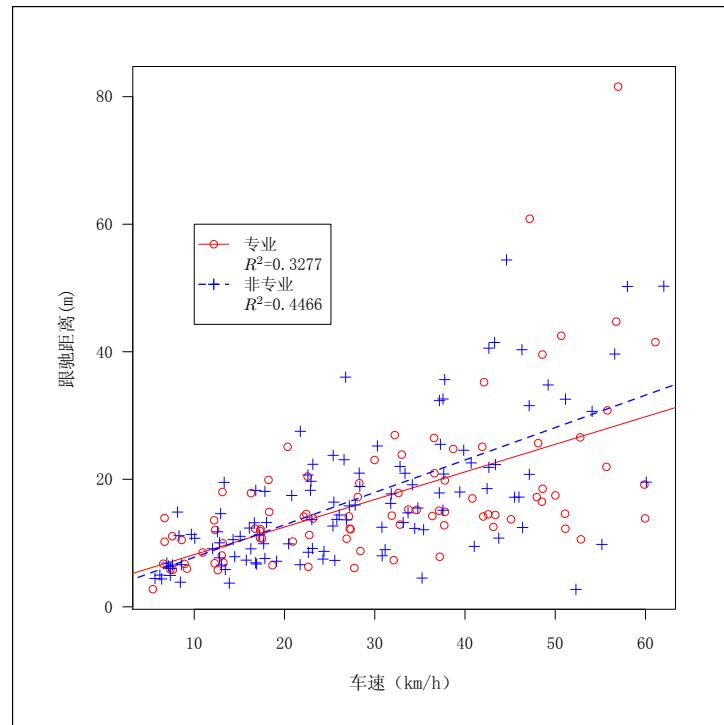


图 4.15 稳定状态下跟驰距离与速度关系图

表 4.2 专业组和非专业组的跟驰距离与速度关系回归系数的差异显著性检验

	估计值	标准误差	t 值	P 值
b	2.69	1.83	1.47	0.14
h_1	1.18	2.77	0.42	0.67
h_2	1.83	0.21	8.75	0.00
h_3	-0.27	0.30	-0.90	0.37

4.2.3 加速度与车辆相互运动的关系

加速度与车辆相互运动的关系反应了驾驶人跟驰行为特性中相对不稳定的部分。按照刺激反应模型的假设，驾驶人在一定的相对速度下选择相应的合适的加速度，当与前车有接近趋势时则选择负的加速度，有远离趋势时选择正的加速度，而驾驶人采取的加速度与受到的刺激（速度差）成正比。一般化的 GM 模型认为加速度不仅与速度差有关还与跟驰距离以及车速有关。

Xin 等 (2008)^[58] 提出了驾驶人加速度模型，认为驾驶人的与前车的视觉扩张率有关，但是未明确指出其关系。其视觉扩张率指，物体投射在视网膜上的角度的变化率，

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{W/2}{D(t)} \quad (4.4)$$

$$\frac{\sin(\theta)}{\dot{\theta}} = \frac{D(t)}{\Delta V} \quad (4.5)$$

其中：

θ = 前车投射在视网膜上的角度

$\dot{\theta}$ = 前车投射在视网膜上的角度的变化率即视觉扩张率

W = 前车宽度

$D(t)$ = t 时刻的车头间距

ΔV = 相对速度

在驾驶过程中前车投射在驾驶人视网膜上的角度较小，因此视觉扩张率可以近似为：

$$\theta \approx \frac{W}{D} \quad (4.6)$$

$$\frac{\dot{\theta}}{\theta} = \frac{D(t)}{\Delta V} \quad (4.7)$$

$$\dot{\theta} = W \frac{\Delta V}{D^2} \quad (4.8)$$

在交通冲突技术中 Time-To-Collision(TTC) 被证明是有效的度量交通冲突严重程度的手段。Hayward(1972)^[59] 定义 TTC 为：“两车保持当前速度和路线而相撞所需要的时间。”Lee (1976)^[60] 定义 TTC 为两物体距离比上其相对速度。Balas 和 Balas (2006)^[61] 比较了 TTC 倒数和 TTC，认为 TTC 倒数比 TTC 更为直接和连续的反映了碰撞的危险，并且认为 TTC 倒数可用于解释驾驶人的驾驶行为。

基于加速度与速度差以及跟驰距离有关的观点，假设前车宽度基本不变，将实验中所获取的数据分组集计：分别对专业组和非专业组驾驶人按照速度差距离比 $\frac{\Delta V}{D}$ 即 TTC 倒数，加速度与速度差距离平方比 $\frac{\Delta V}{D^2}$ 进行分组，计算每组相应的平均速度差距离比，平均速度差距离平方比，以及平均加速度，得到关系如图 4.16 和图 4.17。

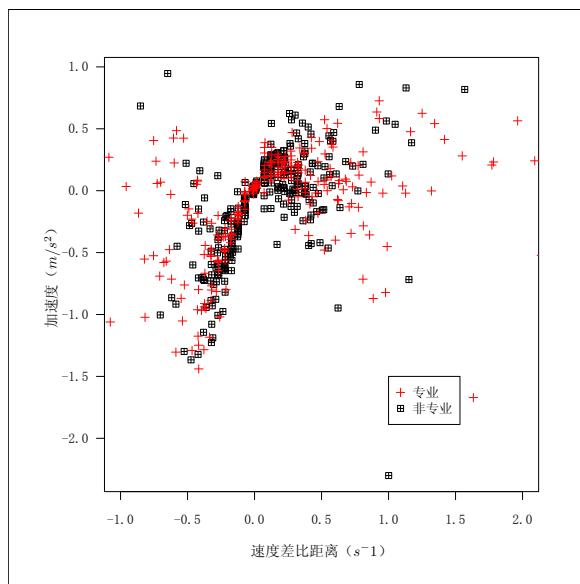


图 4.16 加速度与速度差距离比图

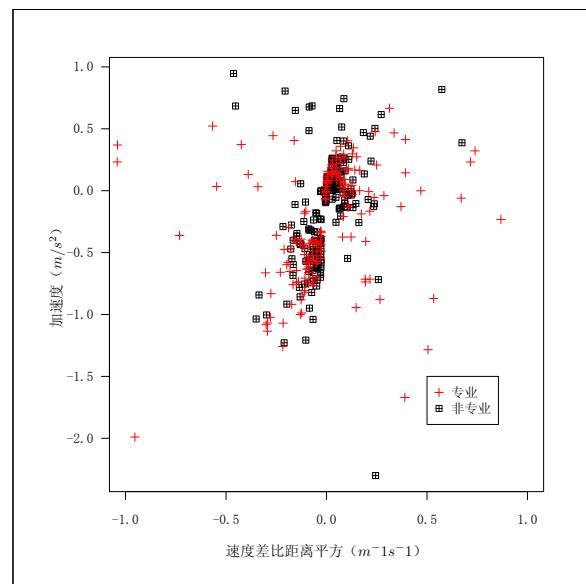


图 4.17 加速度与速度差距离平方比图

对于前车速度小于跟驰车辆的情况，由图 4.16 和图 4.17 中的速度差轴左侧可以发现速度差距离比 (TTC 倒数) 与驾驶人的负减速度存在明显的线性关系，说明驾驶人对于减速情况减速度的选择与

速度差距离比有较大的相关性。而加速度与速度差距离平方比的线性关系则较不明显。而当速度差为正时驾驶人的加速度的分布均十分的分散，这表明驾驶人减速与加速之间存在不对称性。同时专业组和非专业组之间并未表现出明显的差别。

4.2.4 集计分析小结

从集计分析的结果可以发现专业和非专业驾驶人驾驶行为特性的差异得到了混合的结果，在自由行驶与跟驰的临界点方面存在明显的差别，而在稳定状态下速度与跟驰距离，加速度与车辆相互运动的关系特性方面不存在明显的差别。

由于集计分析忽略了更多驾驶条件的影响，例如在相同的速度差条件下速度值不同采取的加速度可能也不同。由于集计对驾驶人不同驾驶条件下的数据进行了平均，因此还需要对数据进行进一步的分析。下一节中将从更加微观的角度分析，使用跟驰模型参数标定的方法，分析跟驰模型参数在驾驶人中的分布情况，并作出相应的分析和推断。

4.3 跟驰模型参数标定

为了进一步研究驾驶人行为特性的异同，并且为通过模拟研究驾驶人行为特性对交通流影响提供依据，本节使用轨迹数据对微观跟驰模型参数进行标定，并使用 Bootstrap 方法对所得结果进行分析和推断。

4.3.1 标定方法框架

Ossen (2008) [24] 给出了一般化的通过轨迹数据标定跟驰模型的框架：

以 $z_n(t)$ 表示驾驶人 n 车辆的真实行驶状态，此状态一般包含车辆的位置 $x_n(t)$ 与速度 $v_n(t)$ ，以 $\xi_n(t)$ 表示驾驶人 n 所面临的交通条件，向量 $\xi_n(t)$ 包含驾驶人 n 对于前方若干辆车的位置、速度等变量的观察和估计：

$$\xi_n(t) = (z_{n-j}(t), \dots, z_{n-1}(t)) \quad (4.9)$$

j 为驾驶人 n 向前观测的车辆个数，本文数据由于技术原因只能测到向前一辆车的动态，标定中也将使用单引导车模型，因此：

$$\xi_n(t) = z_{n-1}(t) \quad (4.10)$$

驾驶人车辆纵向的运动可以用跟驰模型来描述则：

$$\frac{d}{dt} z_n(t) = f(\xi_n(t - T_r | \beta_n)) \quad (4.11)$$

则系统的变化方程为：

$$\hat{z}_n(t_k) = \begin{cases} y_n(t_1) & k = 1 \\ \hat{z}_n(t_{k-1}) + \int_{t_{k-1}}^{t_k} f(\xi_n(s - T_r | \hat{\beta}_n)) ds & \text{其他} \end{cases} \quad (4.12)$$

标定的目标就是找到最优的参数 β_n^* 使得目标函数最小：

$$\beta_n^* = \operatorname{argmin}_{\hat{\beta}_n} g(y_n, \hat{z}_n) \quad (4.13)$$

其中 g 为目标函数，数量化度量模型预测结果和真实结果的差别。

4.3.2 跟驰模型

跟驰模型选用 IDM (Intelligent Driver Model) 智能驾驶模型, IDM 模型自提出以后由于其优良的特性被广泛研究, IDM 模型参数较少且具有明确易理解的物理意义。IDM 模型统一描述了自由行驶和跟驰, 并且可以体现加速和减速的不对称性。

Treiber 等 (2000)^[38] 和 Treiber 和 Helbing(2003)^[39] 假设加速度受到期望速度和期望跟驰距离的影响提出了 IDM 模型, 其形式如下:

$$a_n(t) = a_{max} \left[1 - \left(\frac{V_n(t)}{DV_n(t)} \right)^4 - \left(\frac{D_n(t)}{\Delta X_n(t)} \right)^2 \right], \quad (4.14)$$

其中 a_{max} 为车辆的最大舒适加速度。 V_n 为实际车速, DV 为期望速度, D_n 为期望跟驰距离, ΔX_n 为实际跟驰距离。

驾驶人车辆的加速度由两个部分组成, 其趋向自由行驶部分的加速度为:

$$a_{max} \left[1 - \left(\frac{V_n(t)}{DV_n(t)} \right)^4 \right], \quad (4.15)$$

受前车影响部分的加速度为:

$$-a_{max} \left[\left(\frac{D_n(t)}{\Delta X_n(t)} \right)^2 \right], \quad (4.16)$$

当实际的跟驰距离小于期望跟驰距离时, 此项成为加速度的主要部分。

其期望车头间距给出如下:

$$D_n(t) = \Delta X_n^* + V_n(t)T_n(t) + \frac{V_n(t)\Delta V_n(t)}{2\sqrt{a_{max}b_{max}}}, \quad (4.17)$$

其中 ΔX_n^* 为停车间距, T_n 为期望车头时距, 当距离较小时 ΔX_n^* 占期望跟驰距离的主要部分, T_n 期望车头时距体现了驾驶人对安全跟驰距离的一种期望。 b_{max} 为最大舒适减速度。在大多数情况下将减速度的绝对值限制在其以下。

4.3.3 目标函数

g 为目标函数, 数量化度量模型预测结果和真实结果的差别。本文中使用 Theil's U 作为目标函数,

$$g(y_n, \hat{z}_n) = \frac{\sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (y_n(t_k) - \hat{z}_n(t_k))^2}}{\sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (y_n(t_k))^2} + \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (\hat{z}_n(t_k))^2}} \quad (4.18)$$

其中 y_n 为实际观测值, \hat{z}_n 为模型预测值, 考虑到本文数据采集所使用的方法以及交通流状况, 使用跟驰距离而不考虑将速度代入到 y_n 和 \hat{z}_n 中计算, 理由是实验数据中直接测量的变量包括跟驰距离, 而前车速度经过计算得出, 误差经由一次求导会被放大。城市交通流状况存在较多的停车, 以速度代入也将使目标函数对参数过于敏感不利于得到合理的标定值。

4.3.4 优化算法与搜索范围

本文使用遗传算法（genetic algorithm）对目标函数进行优化，遗传算法是计算数学中用于解决最优化的搜索算法，是进化算法的一种。进化算法最初是借鉴了进化生物学中的一些现象而发展起来的，这些现象包括遗传、突变、自然选择以及杂交等。

遗传算法通常实现方式为一种计算机模拟。对于一个最优化问题，一定数量的候选解（称为个体）的抽象表示（称为染色体）的种群向更好的解进化。一般解用二进制表示（即 0 和 1 的串）。进化从完全随机个体的种群开始，初代种群产生之后，按照适者生存和优胜劣汰的原理，逐代（generation）演化产生出越来越好的近似解，在每一代，根据问题域中个体的适应度（fitness）大小选择（selection）个体，并借助于自然遗传学的遗传算子（genetic operators）进行组合交叉（crossover）和变异（mutation），产生出代表新的解集的种群。这个过程将导致种群像自然进化一样的后生代种群比前代更加适应于环境，末代种群中的最优个体经过解码（decoding），可以作为问题近似最优解。

本文的参数优化过程使用了 Walter 等^[62] 开发的 Rgenoud 解法器，初始种群个数设为 1000，目标函数无改进阈值设置为 0.001，无改进停止代数 10 代。本文中共需标定 5 个参数，分别是 DV 期望车速，最大舒适加速度 a_{max} ，最大舒适减速度 b_{max} ，期望车头时距 T ，最小间距 ΔX^* 。设置参数的搜索范围可以减少运算量并可保证所得结果在合理的范围内，参数的搜索范围如表 4.3。

表 4.3 参数标定搜索范围

参数	$DV(m/s)$	$a_{max}(m/s^2)$	$b_{max}(m/s^2)$	$\Delta X^*(m)$	$T(s)$
范围	[0,30]	[0.3,3]	[0.5,10]	[0,5]	[0,5]

4.3.5 轨迹数据与标定结果

4.1.2.2 节提到经过数据处理大约 40.6% 的数据为有效数据，由于测量系统的特性，数据并不连续。为保证轨迹数据含有足够的信息量从而保证参数标定的可靠性，本文选取长度不小于 10s 的轨迹数据用于参数标定。

结果表明参数标定可以得到拟合良好的轨迹，图 4.18 和图 4.19 为标定结果样例，图中可以看到跟驰距离和车速的模型预测值与实际值吻合良好。

结果样例如表 4.4。

4.3.6 所得估计参数的可靠程度

由于车辆轨迹包含的信息不同，因此一段轨迹只能可靠的估计若干个参数，例如一段停车的轨迹是不可能准确地估计出期望车速，最大舒适加速度和最大舒适减速度的参数，却可能很好地估计出停车间距的参数。而加速过程的轨迹则很难估计最大舒适减速度的参数，反之亦然。所以需要估计所得参数的可靠程度。Greene (2000)^[63] 指出对于一个变量的点估计其方差至少不小于 Cramer-Rao 下限，并且指出其值可用对数似然函数在最大似然估计点的二次偏导数估计。Ossen (2008)^[24] 据此提出了使用参数估计点的目标函数二次偏导数来估计参数估计的可靠程度，即：

$$\frac{\partial^2 g(y_n, \hat{z}_n)}{\partial \beta_i^2} \Big|_{\beta_i = \beta_i^*} \quad (4.19)$$

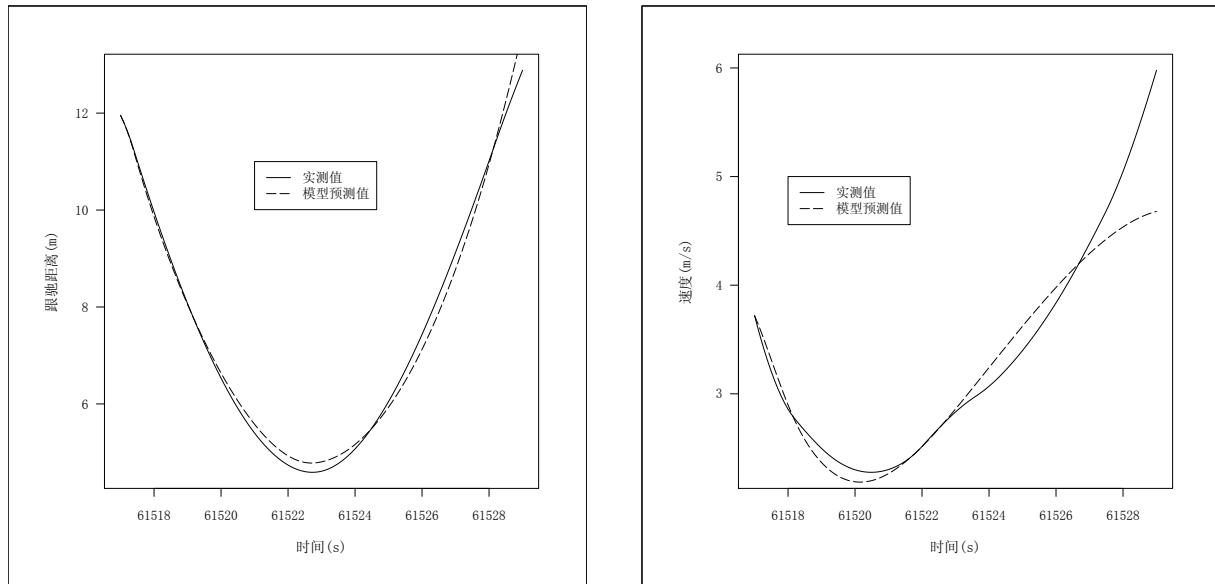


图 4.18 参数标定结果样例 - 跟驰距离变化图

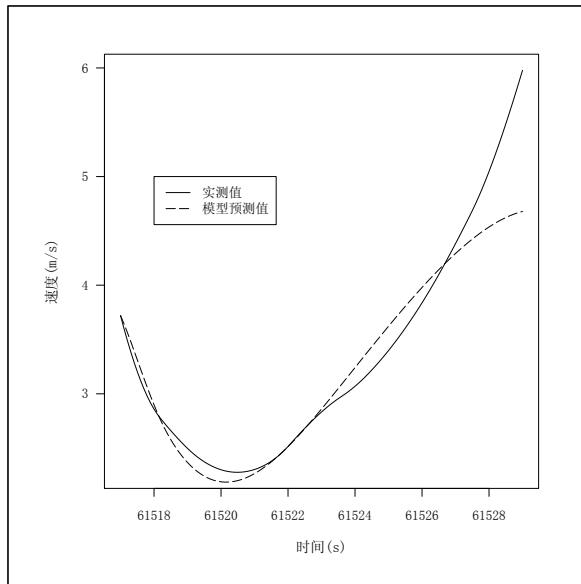


图 4.19 参数标定结果样例 - 车速变化图

表 4.4 标定参数结果样例

$DV(m/s)$	$a_{max}(m/s^2)$	$b_{max}(m/s^2)$	$\Delta X^*(m)$	$T(s)$	目标函数值
19.10	0.62	3.42	1.20	3.90	0.02
9.95	0.30	0.68	4.42	4.70	0.20
12.62	0.54	0.50	4.60	4.54	0.18
14.00	2.88	1.00	4.80	3.99	0.46
1.95	0.30	5.97	1.61	4.36	0.02
5.24	0.37	7.91	3.86	4.26	0.46
6.28	0.63	0.53	3.44	0.84	0.13
2.94	2.88	0.50	4.11	3.50	0.37
8.06	0.42	0.50	3.19	2.02	0.18
4.19	2.04	1.80	2.37	3.15	0.23
21.00	0.87	9.01	0.30	3.64	0.12
...

可以理解二次偏导数为估计参数的敏感度，若二次偏导数越大，则不论向任何一个方向一个小的扰动均会造成目标函数值 g 越大的增加，也就代表参数估计越可靠。

由于所估计参数的取值范围不同，为了统一比较各参数的可靠程度，需对各参数除以其中位数进行规格化，然后计算其二次偏导数。

4.3.7 Bootstrap 与置信区间估计

为了得到两组各参数有效的估计，本文中选取目标函数 g 值 0.2 以下，并且参数二次偏导数不小于 20（则规格化参数改变 0.1，目标函数的改变量应在 $20 \times 0.1^2 = 0.2$ 的数量级）的参数估计作

为最后的结果进行分析。最终，各参数估计值的分布情况如图 4.20 至图 4.29。

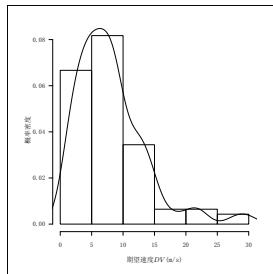


图 4.20 非专业期望速度 DV 分布

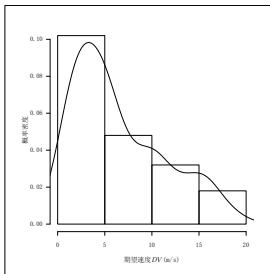


图 4.21 专业期望速度 DV 分布

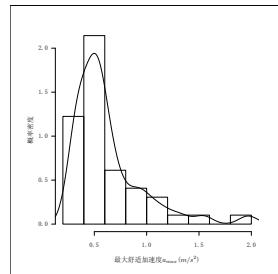


图 4.22 非专业最大舒适加速度 a_{max} 分布

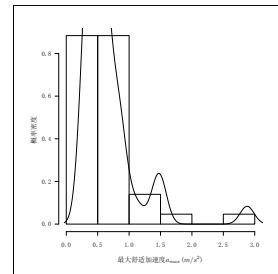


图 4.23 专业最大舒适加速度 a_{max} 分布

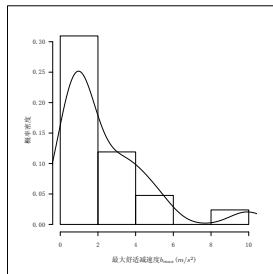


图 4.24 非专业最大舒适减速度 b_{max} 分布

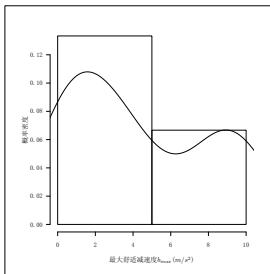


图 4.25 专业最大舒适减速度 b_{max} 分布

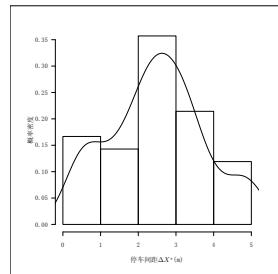


图 4.26 非专业停车间距 ΔX^* 分布

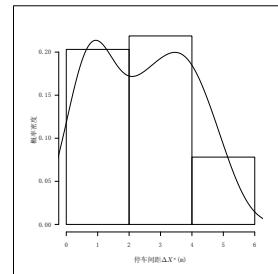


图 4.27 专业停车间距 ΔX^* 分布

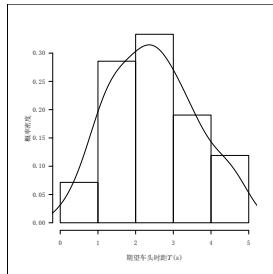


图 4.28 非专业期望车头时距 T 分布

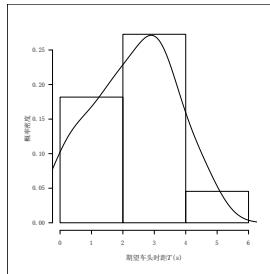


图 4.29 专业期望车头时距 T 分布

由图中可以明显看出各参数的样本分布均不符合正态分布，为了得到各参数在总体中的有效估计，并且比较两组驾驶人各参数的异同。本文使用 Bootstrap，也称自助法来根据样本数据估计各参数的置信区间。Efron (1979)^[64] 最早明确提出了 Bootstrap 方法。Bootstrap 方法是非参数统计中一种重要的估计统计量方差进而进行区间估计的统计方法。其核心思想是通过对样本大量（ N 一般不小于 1000）的可重复的重抽样，通过计算重抽样样本的统计量构造 Bootstrap 分布来近似总体的抽样分布，从而估计样本所属总体的统计量。其渐进有效性对大多数常用分布和统计量已被证明。使用 Bootstrap 方法主要的优点在于无需对总体的分布进行假设，只需样本中的个体满足独立同分布的条件，便能对总体的统计量（例如均值）进行有效的估计。

对于本文中的数据，相邻轨迹数据的间隔一般都在 10s 以上。基于驾驶人自身行为具有差异性的假设，可以认为驾驶人在不同时刻的驾驶行为是独立的，那么估计所得各参数值可以认为符合独立同分布的条件。

Bootstrap 结果中样本均值与总体均值的 95% 置信区间估计如表 4.5，样本标准差与总体标准差的 95% 置信区间估计如表 4.5。Kesting 和 Treiber (2008)^[65] 的对照结果如表 4.7。可以发现各参数

均值均在合理范围内，且非专业组与专业组的参数均值主要在期望速度 $DV(m/s)$ 和最大舒适减速度 $b_{max}(m/s^2)$ 存在差异。

表 4.5 IDM 参数均值估计

	非专业驾驶人		专业驾驶人	
	样本均值	95% 置信区间	样本均值	95% 置信区间
$DV(m/s)$	8.09	(6.978,9.236)	6.48	(5.549,7.421)
$a_{max}(m/s^2)$	0.63	(0.531,0.718)	0.66	(0.523,0.802)
$b_{max}(m/s^2)$	2.33	(1.362,3.295)	4.29	(2.621,5.949)
$\Delta X^*(m)$	2.50	(2.124,2.878)	2.41	(1.905,2.931)
$T(s)$	2.46	(2.140,2.783)	2.34	(1.810,2.886)

表 4.6 IDM 参数标准差估计

	非专业驾驶人		专业驾驶人	
	样本标准差	95% 置信区间	样本标准差	95% 置信区间
$DV(m/s)$	5.55	(4.338,6.866)	4.83	(4.286,5.440)
$a_{max}(m/s^2)$	0.34	(0.229,0.474)	0.46	(0.243,0.724)
$b_{max}(m/s^2)$	2.31	(1.310,3.531)	3.69	(3.053,4.593)
$\Delta X^*(m)$	1.27	(1.043,1.523)	1.50	(1.305,1.749)
$T(s)$	1.12	(0.936,1.333)	1.32	(1.052,1.643)

表 4.7 Kesting^[65] 的 IDM 参数估计

	Data Set1		
	$F_{rel}(s)$	$F_{mix}(s)$	$F_{abs}(s)$
误差 (%)	24.0	20.7	20.7
$DV(m/s)$	70.0	69.9	70.0
$T(s)$	1.07	1.12	1.03
$\Delta X^*(m)$	2.41	2.33	2.56
$a_{max}(m/s^2)$	1.00	1.23	1.40
$b_{max}(m/s^2)$	3.21	3.20	3.73

对样本的分层 Bootstrap，可以获得总体的非专业与专业驾驶人参数均值差的置信区间估计，期望速度 $DV(m/s)$ 和最大舒适减速度 $b_{max}(m/s^2)$ 的 Bootstrap 分布及正态 Q-Q 如图 4.30 和图 4.31，图中的 Bootstrap 分布基本上符合正态分布，且样本均值差具有较小的偏差，因此其总体均值差的 95% 置信区间是可靠的。置信区间估计结果如表 4.8，可以看到非专业驾驶人的期望速度大于专业驾驶人，而其最大舒适减速度小于专业驾驶人。

综合以上结果，可以推断在不同的驾驶人之间其期望速度和最大减速度存在差异。期望速度的差异说明驾驶人在大致相同条件下其希望的行驶速度是不同的，这反映了不同驾驶人综合考虑自身需求和对道路交通条件适应的结果。由于样本中非专业组与专业组的年龄存在差异，期望速度的差异可能因为年龄或其他差异而非驾驶经验的差异。而不同驾驶人间最大减速度的差异，反应了驾驶人减速的能力，非专业驾驶人由于驾驶经验较短可能对于潜在的危险情况认识不足，导致其减速能力较低。

表 4.8 样本均值差（非专业减去专业）与总体均值差 95% 置信区间估计

	样本均值差	95% 置信区间
$DV(m/s)$	1.60	(0.072,3.048)
$a_{max}(m/s^2)$	-0.03	(-0.204,0.137)
$b_{max}(m/s^2)$	-1.95	(-3.774,-0.115)
$\Delta X^*(m)$	0.09	(-0.552,0.751)
$T(s)$	0.12	(-0.519,-0.742)

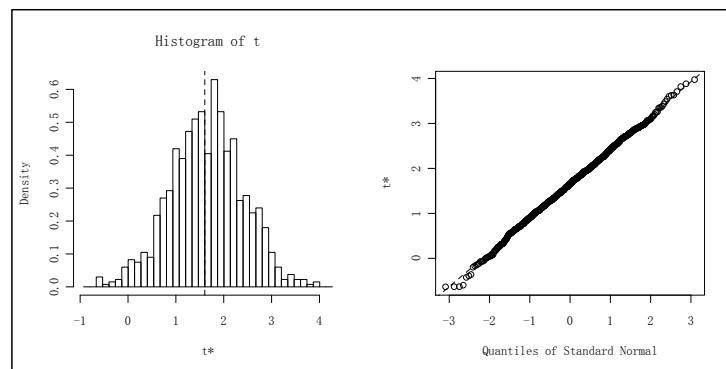


图 4.30 非专业与专业驾驶人期望速度 v_{des} 参数差值分层 Bootstrap 分布及正态 Q-Q

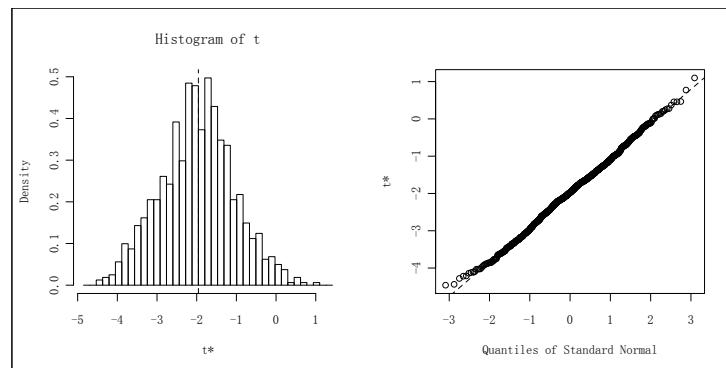


图 4.31 非专业与专业驾驶人最大舒适减速度 b_{max} 参数差值分层 Bootstrap 分布及正态 Q-Q

4.4 本章小结

本章对所采集数据进行了处理和分析，数据处理部分主要采用了局部加权拟合的方法对原始数据进行了平滑和筛选，取得了良好的效果。本章主要通过集计分析和跟驰模型参数标定的方法研究了驾驶人行为特性的异同，集计分析针对驾驶人的自由行驶与跟驰的临界点、稳定状态下跟驰距离与速度的关系和加速度与车辆相互运动的关系进行了研究。跟驰模型的参数标定通过对 IDM 模型的参数标定和 Bootstrap 方法研究了专业和非专业驾驶人参数分布的异同。研究结果表明非专业组和专业组驾驶人在自由行驶与跟驰的临界点，期望速度和最大减速度方面存在差异，为下一章研究驾驶人行为特性对交通流影响提供了依据。

第五章 驾驶人行为特性对交通流影响

5.1 研究方法

为了研究驾驶人行为特性对交通流的影响，由于交通流的复杂性，同时由于很难对道路上的驾驶人个体进行逐个的观测与调查，本文使用微观模拟的方法对驾驶人行为特性对交通流影响进行研究。

根据第四章所得出的结果，专业与非专业驾驶人行为的差异主要体现在期望速度和最大减速速度这两方面，因此本章将通过混合不同期望速度和最大减速速度参数的驾驶人在典型的道路场景中进行微观模拟仿真从而研究驾驶人行为特性对交通流影响。

5.1.1 模拟软件 SUMO 简介

根据 Krajzewicz 等（2006）^[66] 2000 年起，德国航空中心（DLR）的交通研究所（IVF）开始开发微观交通模拟软件。并以开源的形式发布了整个软件包 SUMO，作为交通研究中算法和模型的一般测试平台。SUMO 为“Simulation of Urban MObility”的缩写，SUMO 已被应用于模拟 Magdeburg 市域和 Cologne 市域的交通情况，其应用主要关于交通管理和交通预测。

根据 Krajzewicz 等（2005）^[67]，SUMO 的默认值使用了 Krauß 跟驰模型，Krauß（1998）^[68] 提出了一个微观的空间连续的随机跟驰模型，主要基于安全速度假设：驾驶人为了对前车减速保有一定的安全余量，选择一定的安全速度。模型假设驾驶人的反应时间 tau 为 1s。并且 SUMO 可以很好的重现密度流量关系图，如图 5.1，图中左边为实测密度流量图，右边为 SUMO 模拟的密度流量图。

Krauß 模型给出如下：

$$v_{safe} = v_l(t) + \frac{g(t) - v_l(t)\tau}{\frac{\bar{v}}{b(\bar{v})} + \tau} \quad (5.1)$$

其中：

$v_l(t)$ – t 时刻前车速度

$g(t)$ – t 时刻与前车的空间间隔

τ – 驾驶人的反应时间

b – 减速函数，决定了最大减速速度

为了保证车辆不超过其物理加速能力和最大速度，计算 $v_{des}(t)$

$$v_{des}(t) = \min[v_{safe}, v(t) + a_{max}, v_{max}] \quad (5.2)$$

最后从期望速度中减去随机项，使得模型变为随机

$$v_t(t) = \max[0, \text{rand}[v_{des}(t) - \epsilon a, v_{des}(t)]] \quad (5.3)$$

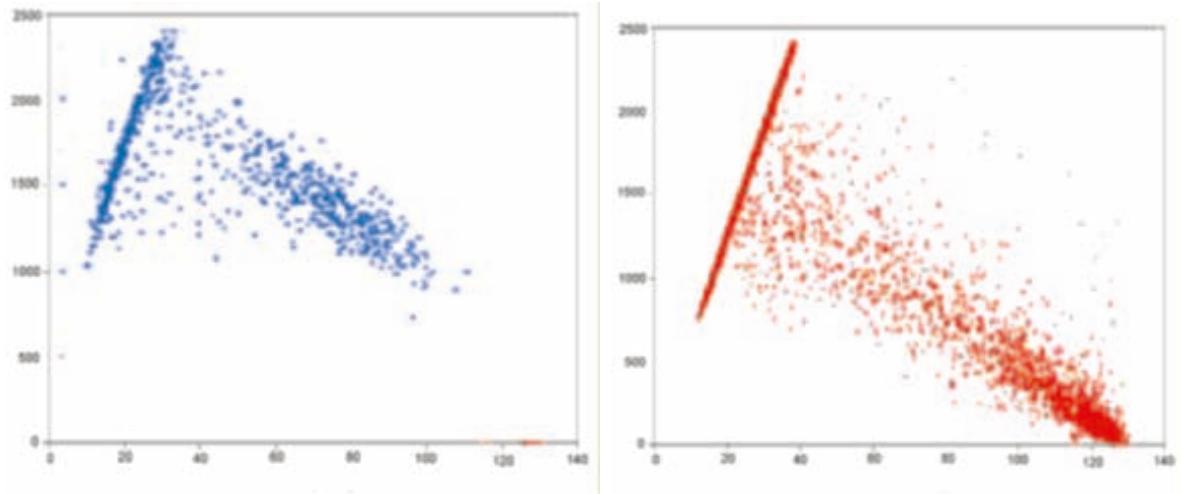


图 5.1 SUMO 模拟密度 - 流量例图（摘自 Krajzewicz 等（2005）^[67]）

5.1.2 模拟研究的有效性

Ossen (2008)^[24] 研究表明，通过 Gipps 模型构造的人造轨迹数据对 Tampère 进行参数标定，结果表明即使模型不同，只要有足够的观测，仍可以对驾驶人的跟驰行为得出相似的理解。因此即使不存在完美的跟驰模型，仍可以从实际观测数据对驾驶人行为作出合理推断，同时相似结构的模型可以揭示出相似的驾驶人行为特征。由于 Krauß 模型与 IDM 模型的参数结构相似，均考虑了驾驶人的期望速度，最大加速度，最大减速度，从前一章根据 IDM 模型得出的驾驶人差异性的结论仍可以认为对 Krauß 模型模型是成立的，因此使用 Krauß 模型进行模拟是可行的。

Kerner^[69] 认为，传统的基于基本图的交通流理论不能解释，高速公路交通流的实际观测到的拥堵现象，提出了三相交通流理论。Kerner 认为传统跟驰模型不能重现实际观测中的散落的密度 - 流量基本图。

Schönhof 和 Helbing^[70] 指出传统跟驰模型不能重现实际观测中的散落的密度 - 流量基本图，是由于未考虑驾驶人驾驶行为的差异性，传统模型的混合驾驶人模拟被证明可以重现实际观测中的散落的密度 - 流量基本图。

5.1.3 模拟场景

如图 5.2 中，本文模拟场景设置为 600m 直线路段，单向 3 车道，为了增加扰动在路段末端设为 2 车道。共设置 6 个线圈检测器，分别在 150m 处和 450m 处。

模拟中的输入的交通流量设为三条车道均等，设置 0-1200s，流率为 600 辆/小时，1200-2400s，流率为 1800 辆/小时，2400-4800s，流率为 600 辆/小时，如图 5.3

为了研究驾驶人行为特性对交通流的影响，结合第四章所得结论。主要考察三种效应的影响，一为驾驶人期望车速对交通流的影响，二是驾驶人最大减速度对交通流的影响，三为两者混合效应（专业与非专业驾驶人混合）的影响。

针对三种效应，对每一种效应分别选择 A、B 两种驾驶人，以不同数值赋予所研究效应的对应参数，分别如表 5.1，表 5.2 和表 5.3。表中 A、B 型驾驶人的模型参数选择了第四章跟驰模型参数标

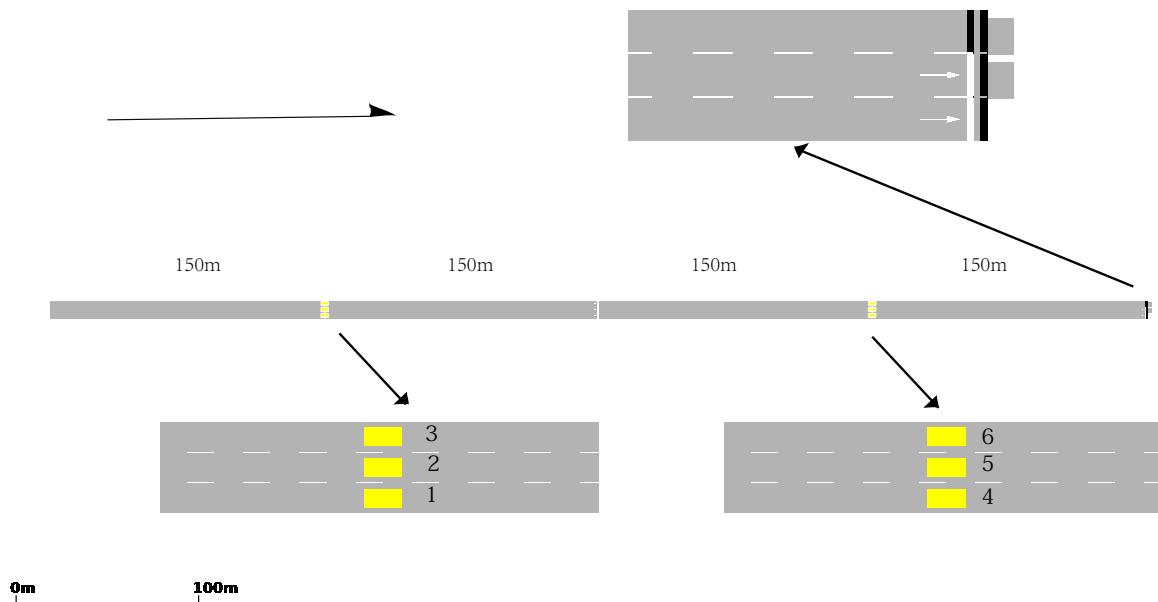


图 5.2 模拟场景图

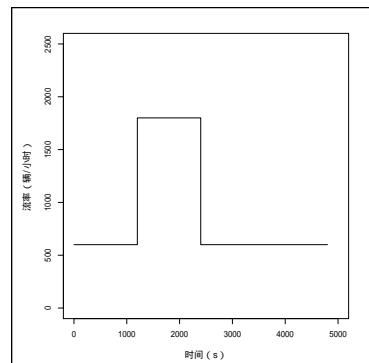


图 5.3 交通需求随时间变化图

定结果的平均值。以全部 A 类型驾驶人，1: 3, 1: 1 和 3: 1 的比例混合和全部 B 类型驾驶人分别进行模拟，也就是说 B 类型的驾驶人从 0% 到 25%, 50%, 75% 增加到 100%，由于在驾驶人混合中，车辆的出发顺序随机，在驾驶人混合中以不同随机种子数模拟 10 次。

尽管 Krauss (1998)^[68] 指出，Krauß 模型之所以能够模拟实际观测中出现的交通流相位变化是由于其随机项导致的，但是其模拟的速度轨迹往往很不符合实际情况，并且其模型中随机项对交通流的影响没有确定性的结论，为了减少其他影响因素本文模拟中未使用随机项，而驾驶人的反应时间 tau 设置为 1s。

5.1.4 评价指标

本文主要从效率性和安全性两个角度评价对交通流的影响作用。

效率性方面，主要从模拟所需要的总时间、速度流量基本图、密度流量基本图来分析交通流效率性的影响。

表 5.1 期望速度效应的模型参数

驾驶人类型	A	B
最大加速度	0.62	0.62
最大减速度	2.33	2.33
期望速度	6.48	8.09

表 5.2 最大减速度效应的模型参数

驾驶人类型	A	B
最大加速度	0.62	0.62
最大减速度	2.33	4.29
期望速度	8.09	8.09

表 5.3 混合效应的模型参数

驾驶人类型	A	B
最大加速度	0.62	0.62
最大减速度	2.33	4.29
期望速度	8.09	6.48

安全性方面，通过 SUMO 的轨迹输出计算 TTC 倒数值，4.2.3 节给出了 TTC 及 TTC 倒数的定义。其中仅考虑前车速度较小的情况，也就是 TTC 值为负的情况，符号仅代表速度差的方向，其大小以绝对值进行比较，绝对值越大代表越危险。评价中以 TTC 倒数与流量的关系和模拟时间内的 TTC 倒数的时间平均值来评价安全性。

5.2 三相交通流理论简介

下文中由于涉及到三相交通流理论的概念，此处对三相交通流理论作简要介绍。

Kerner 和 Rehborn (1996, 1996a, 1997)^[71-73], Kerner (1998)^[74] 通过对德国 A5 高速公路的观测，发现了一系列高速公路交通流中的拥堵形成与消散的特殊现象。基于这些经验性的观测，Kerner (2004)^[75] 提出了三相交通流理论。

5.2.1 三个相位

在三相交通流的理论框架下，共分三个交通流的相位，分别为自由流相位 F、同步流相位 S 和宽运动阻塞流相位 J。

其中自由流为速度较高，各车道车速无显著相同趋势的相位。表现为密度流量图上，流量随着密度线性增加的区域。除了自由流以外的相位为拥挤流，拥挤流有分为同步流相位和宽运动阻塞流相位。

宽运动阻塞流相位的特征为，车速很低有时降为零，阻塞的下游前端保持一定速度向上游传播。

拥挤流其他的状态被归为同步流，同步流速度显著不为零，且下游前端并不保持一定的速度，往往位于瓶颈处。同步流的名称得自于其车辆间和车道间的速度同步效应。

5.2.2 相位转换

为了解释相位变化，根据 Kerner (2009)^[69]，主要存在三种效应 Speed Adaptation, Over-Acceleration 和 Over-Deceleration，它们之间的相互竞争导致了交通流的相位变化。

Speed Adaptation 效应，指的是当车辆无法超越前方的慢车时，其车速与前车车速趋于相同的效应，speed adaptation 效应解释了当前后车车速相同时，跟驰距离在一定的范围内变动。Speed Adaptation 效应的速度跟驰距离示意图如图 5.4

Over-Acceleration 效应，指的是在前车速度较慢的情况下，驾驶人寻找机会超车的行为。

Over-Deceleration 效应，指的是当前车忽然减速的情况下，驾驶人有一个延后时间才开始减速，如果驾驶人过度减速则会使得车速慢于前车，当这种扰动不断向上游传递，速度的降低幅度会逐渐

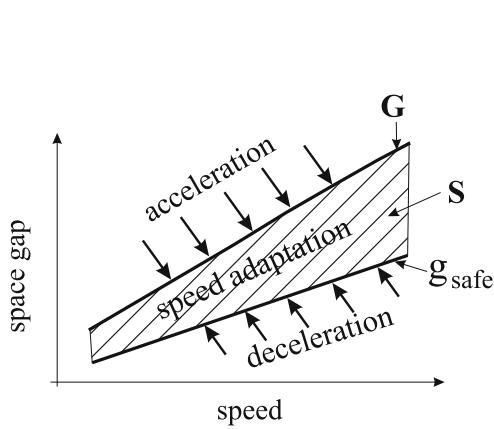


图 5.4 Speed Adaptation 效应的速度跟驰距离示意图^[69]

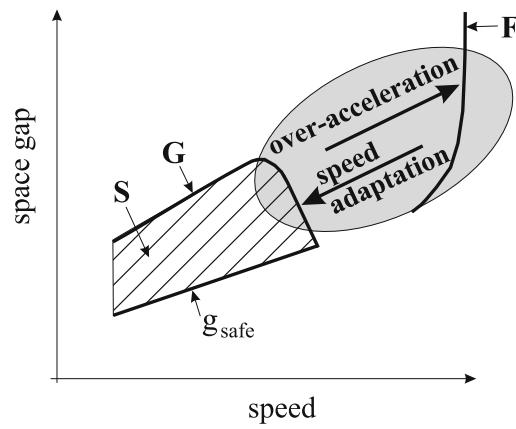


图 5.5 Speed Adaptation 效应和 Over-Acceleration 效应竞争示意图^[69]

累积而增大。

Kerner 将相位的转换解释为这三种效应的两两竞争，自由流 F 和同步流 S 的相互转换为 Speed Adaptation 效应和 Over-Acceleration 效应相互竞争的结果，其示意图如图 5.5，同步流 S 和宽运动阻塞流 J 的相互转换为 Speed Adaptation 效应和 Over-Deceleration 效应相互竞争的结果。

5.2.3 无数个通行能力和 J 线的含义

根据实际观测中的密度流量图，三相交通流理论认为不存在唯一的通行能力，而是在一定密度范围内自由流均有概率发生 F 到 S 的相位变化，因此提出了无数个通行能力的概念。其示意图如图 5.6。

三相交通流理论中的 J 线为密度流量图上代表宽运动阻塞的稳定传播的直线，其斜率由宽运动阻塞流前端的平均速度决定，J 线将同步流区域划分为两块，J 线以上为微妙稳定的同步流状态，而 J 线以下为稳定的同步流状态。微妙稳定的同步流状态指 S 相位到 J 相位的转换可以自行发生。J 线的示意图如图 5.7。

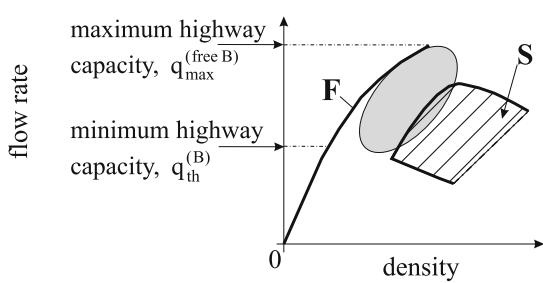


图 5.6 无数个通行能力的示意图^[69]

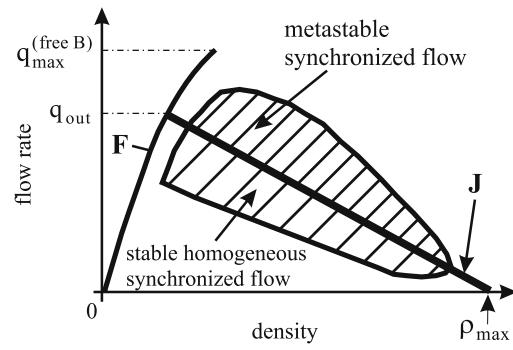


图 5.7 J 线示意图^[69]

5.3 驾驶人行为特性对交通流效率性的影响

5.3.1 期望速度影响因素

图 5.8 给出了期望速度影响下模拟总用时的变化箱图，随着表 5.1 中期望速度较大的 B 型驾驶人的增加，模拟所用时间呈现下降的趋势。对于单纯类型的驾驶人组合，期望速度由 6.48m/s (23.3km/h) 增加 8.09m/s (30.6km/h)，增加 24.8%，模拟用时从 6720s 下降到 6540s，降低了 3%。当不同类型驾驶人混合驶入时模拟时间在一定的范围内变化，例如当有 75% 的 B 型驾驶人混入时，模拟时间的变动范围超过了 200s，这表明车辆的驶入顺序对模拟时间产生影响，不同期望速度驾驶人的混合增加了交通流的随机性。

图 5.9 给出了期望速度影响下速度流量关系的变化情况，由图 5.9 可以看出，期望速度主要对速度—流量关系图中的形状有影响，对最大通行能力和最大通行能力所对应的最佳车速基本没有影响，图中可以看出最大通行能力约为 1600veh/h，最佳速度均大约在 22km/h。期望速度对速度—流量关系图中的形状的影响主要体现在最佳车速的右侧的自由流的阶段。由于两组的期望速度均超过了最佳车速，因此不能排除当期望速度低于最佳车速时可能会对最大通行能力产生影响。

图 5.10 给出了期望速度影响下密度流量关系的变化情况，由图 5.10 可以看出期望速度对最佳密度基本没有影响，最佳密度大约为 75veh/km。根据 Kerner 的三相交通流理论，道路介于最大和最小通行能力之间具有无数个通行能力，图 5.10 中 a、b、c、d 的最小通行能力大约为 500veh/h，而 e 的最小通行能力稍大于其他的情况，这似乎表明最小通行能力受到驾驶人群体中最低期望车速的影响。

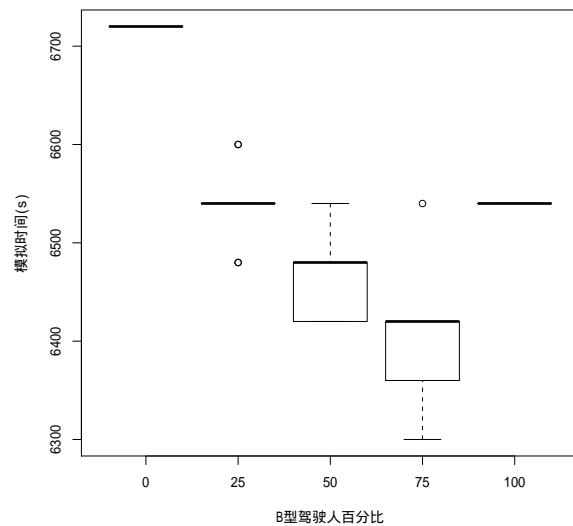


图 5.8 期望速度影响下模拟用时箱图

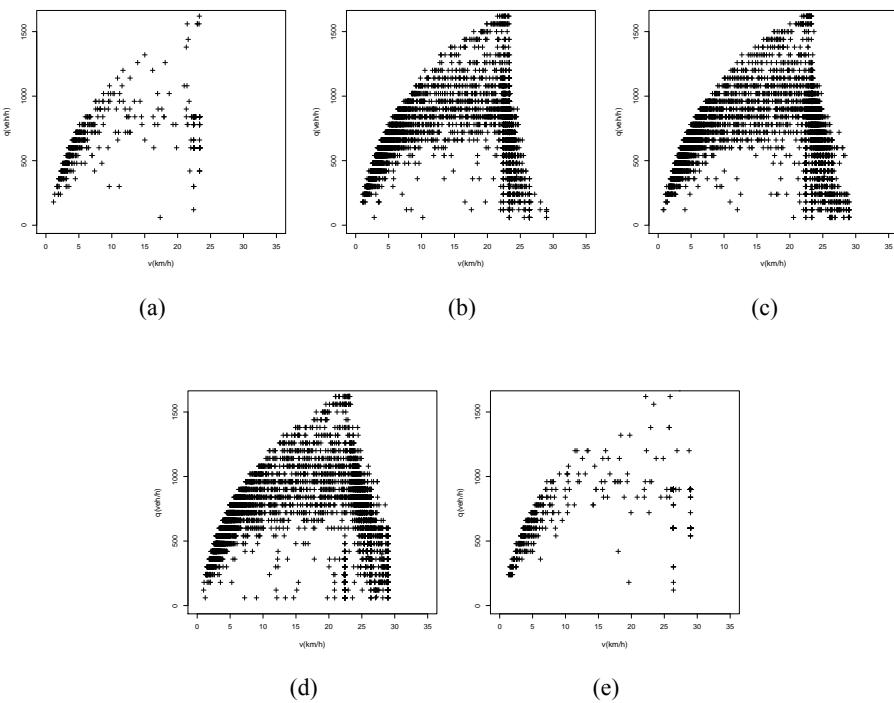


图 5.9 期望速度影响下速度流量关系图 (a) (b) (c) (d) (e) 分别表示表 5.1 中的 B 型驾驶人的百分比分别为 0%, 25%, 50%, 75%, 100%

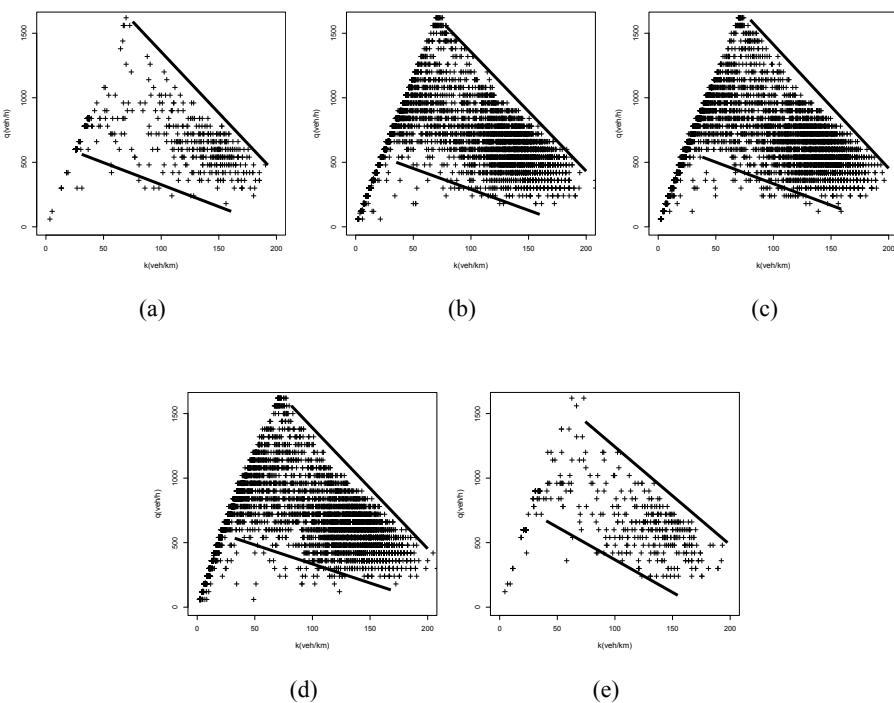


图 5.10 期望速度影响下的密度流量关系图 (a) (b) (c) (d) (e) 分别表示表 5.1 中的 B 型驾驶人的百分比分别为 0%, 25%, 50%, 75%, 100%

5.3.2 最大减速度影响因素

图 5.11给出了最大减速度影响下模拟总用时的变化箱图，随着表 5.2中最大减速度较大的 B 型驾驶人的增加，模拟所用时间呈现上升的趋势。对于单纯类型的驾驶人组合，最大减速度由 $2.33m/s^2$ 增加 $4.29m/s^2$ ，增加 84%，模拟用时从 6540s 增加到 7080s，增加了 8.3%。少量的 B 型驾驶人即可对总模拟用时造成较大影响，并且使得模拟时间具有很大随机性。

图 5.12和图 5.13分别给出了最大减速度影响下速度流量关系图和最大减速度影响下的密度流量关系图，可以看出，随着表 5.2中最大减速度较大的 B 型驾驶人的比例增加，在速度流量和密度流量关系图上均更难达到最大通行能力。这种趋势随着 B 型驾驶人的增加而更为明显。最大减速度的增加造成密度流量图上，集中在 J 线以上，相对不稳定的状态。图 5.14给出了最大减速度影响下各检测器密度流量关系图，从各检测器的密度流量状态跃迁图看，最为明显的是，检测器 1 和 4 的最大或接近最大通行能力，随着 B 型驾驶人的更多的混入，从自由流的状态更多的往同步流状态跃迁。这表明最大减速度的增加对交通流的效率性存在负面影响。

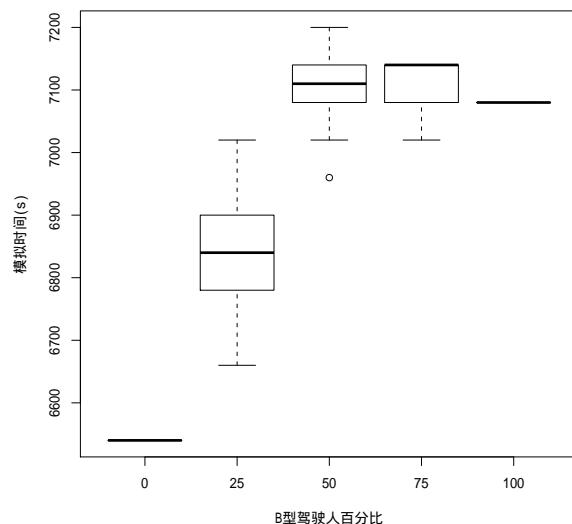


图 5.11 最大减速度影响下模拟用时箱图

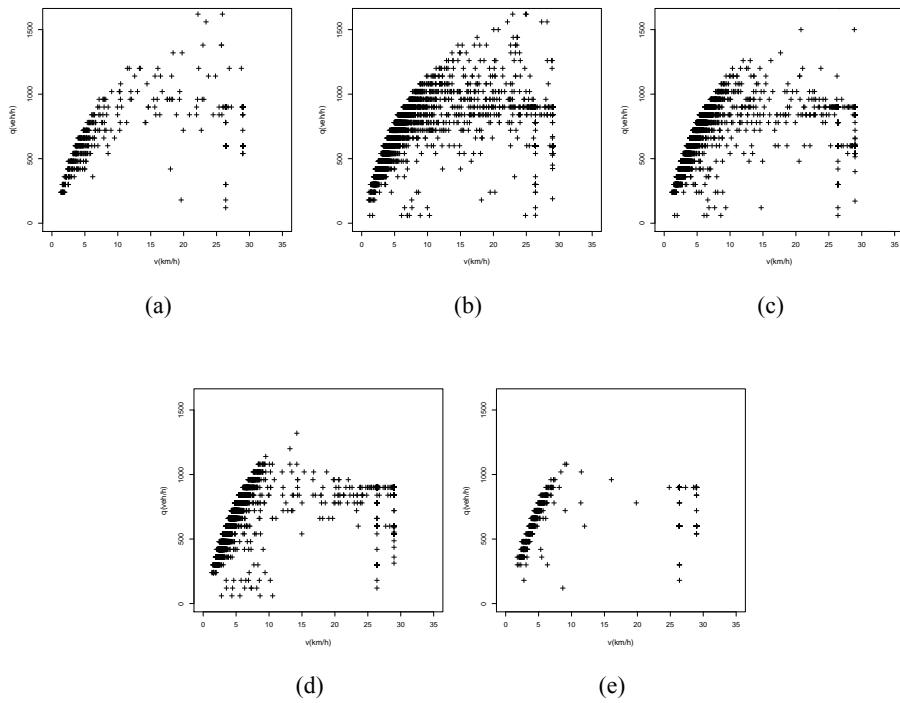


图 5.12 最大减速度影响下速度流量关系图 (a) (b) (c) (d) (e) 分别表示表 5.2 中的 B 型驾驶人的百分比
分别为 0%, 25%, 50%, 75%, 100%

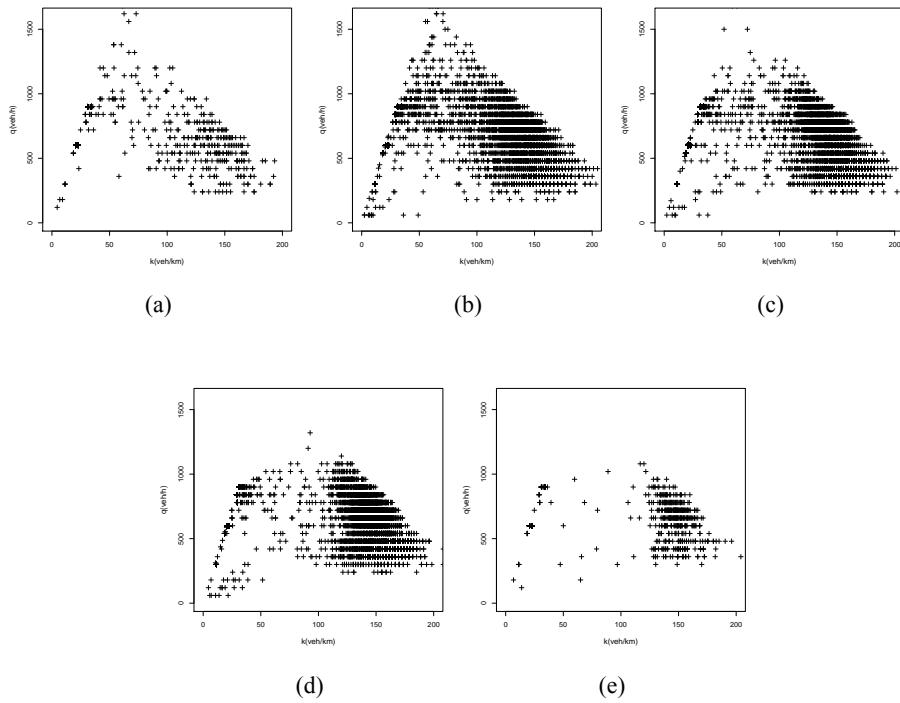


图 5.13 最大减速度影响下的密度流量关系图 (a) (b) (c) (d) (e) 分别表示表 5.2 中的 B 型驾驶人的百分比
分别为 0%, 25%, 50%, 75%, 100%

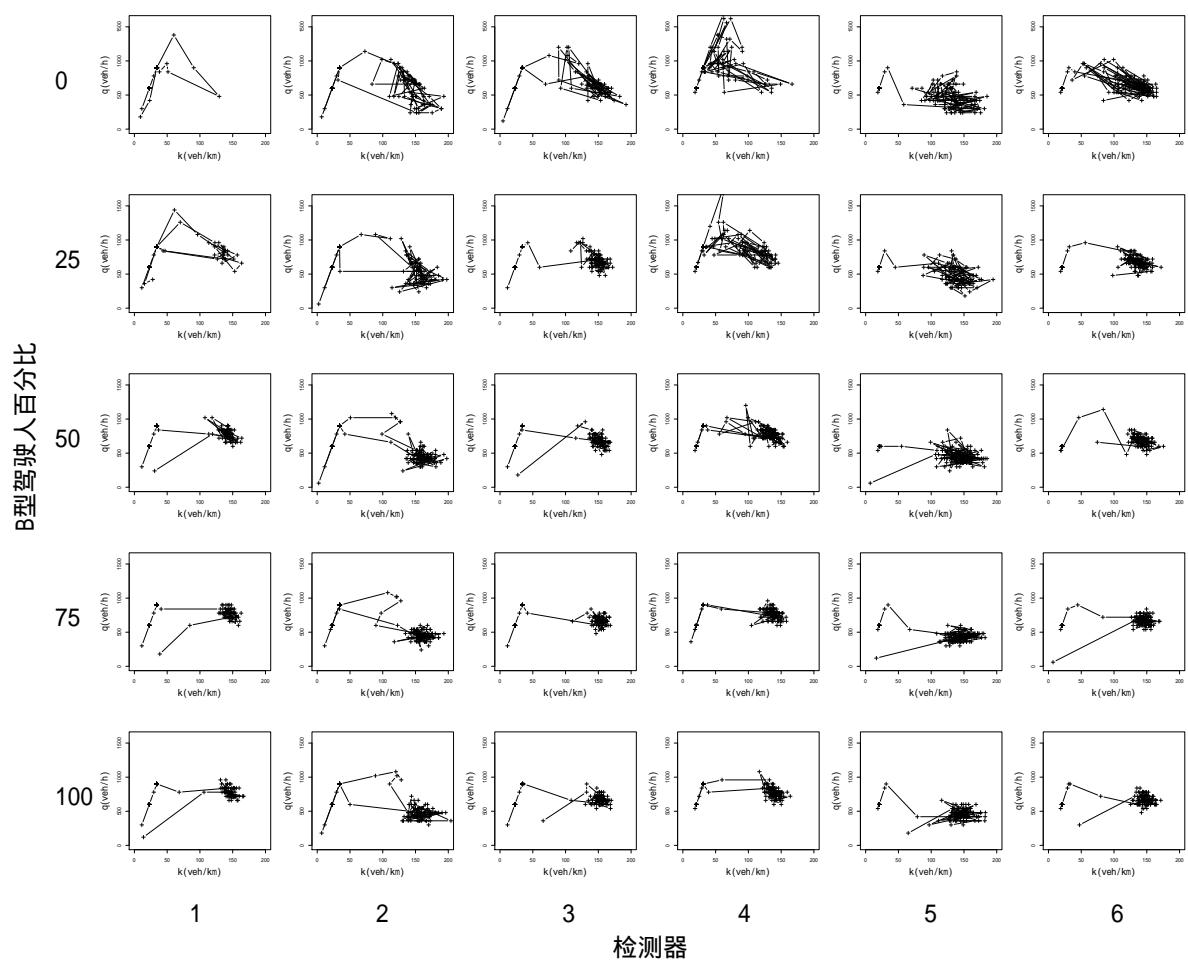


图 5.14 最大减速度影响下各检测器密度流量关系图

5.3.3 混合影响因素

图 5.15、图 5.16、图 5.17、图 5.18，分别给出了混合作用影响下模拟用时箱图、速度流量关系图、密度流量关系图和各检测器密度流量关系图。其结果与最大减速度影响下的结果相似，可以推断对交通流效率性的影响，主要的贡献成分来自于最大减速度的影响，最大减速度越大则交通流越难达到最大通行能力，也越多的处于较为不稳定的同步流状态。

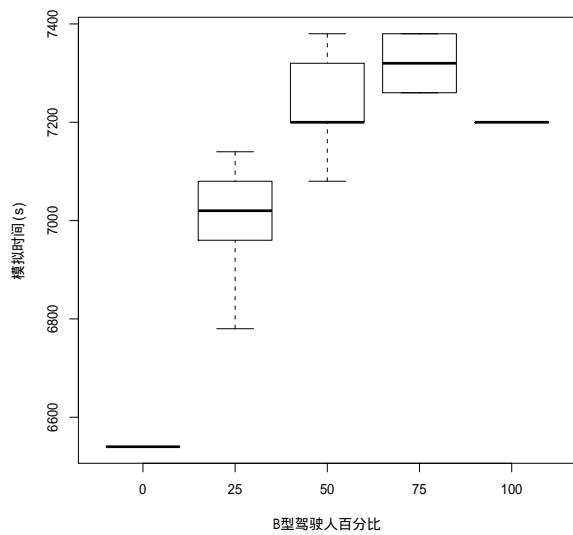


图 5.15 混合作用影响下模拟用时箱图

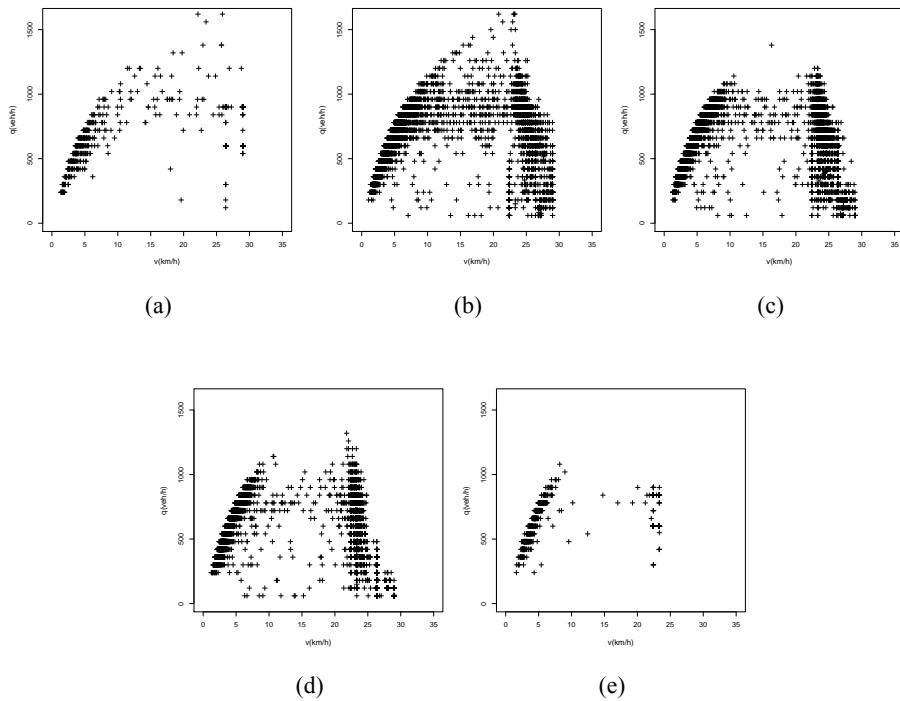


图 5.16 混合作用影响下速度流量关系图 (a) (b) (c) (d) (e) 分别表示表 5.3 中的 B 型驾驶人的百分比分别为 0%, 25%, 50%, 75%, 100%

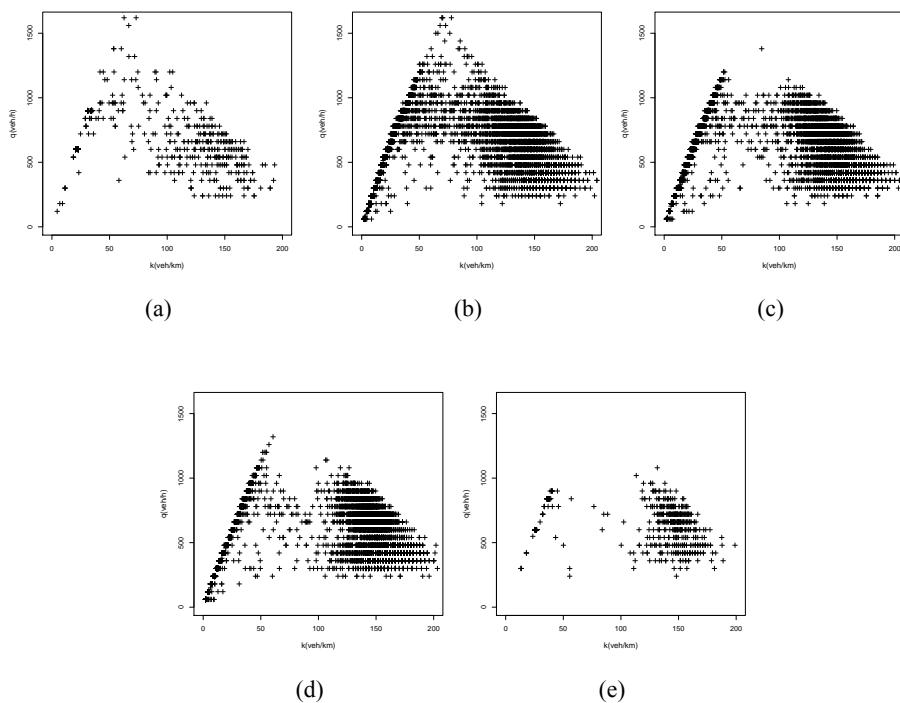


图 5.17 混合作用影响下的密度流量关系图 (a) (b) (c) (d) (e) 分别表示表 5.3 中的 B 型驾驶人的百分比分别为 0%, 25%, 50%, 75%, 100%

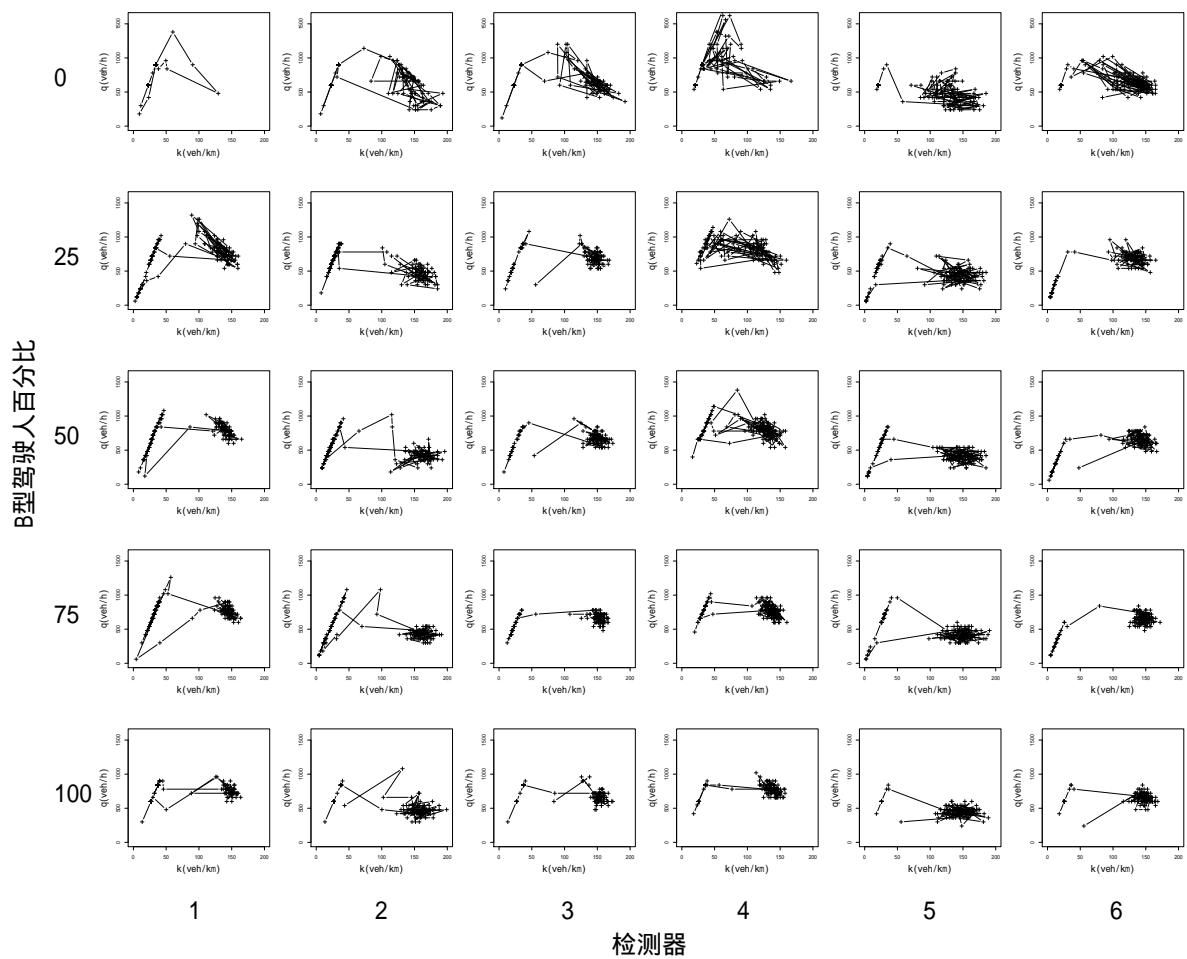


图 5.18 混合作用影响下各检测器密度流量关系图

5.4 驾驶人行为特性对交通流安全性的影响

为了评价交通流安全性，本文使用了 TTC 倒数的一分钟和值以及 TTC 倒数的时间平均产生密度来评价交通流安全性，路段交通流的流量以 6 个检测器流量的一分钟平均值来代表。

5.4.1 期望速度影响因素

图 5.19 给出了期望速度影响下流量与 TTC 倒数关系变化情况，可以看出 TTC 倒数的和值的绝对值最大出现在流量 600—800 之间，从图上看期望速度对 TTC 倒数和值的分布没有显著影响。图 5.20 给出了期望速度影响下流量与时间平均 TTC 倒数关系变化箱图，可以看出期望车速对时间平均 TTC 倒数（TTC 倒数的时间产生密度）的绝对值有显著的影响，随着期望车速较高的 B 型驾驶人的混入，时间平均 TTC 倒数的绝对值呈现增加的趋势，对于单纯类型的驾驶人组合，期望速度由 6.48m/s (23.3km/h) 增加 8.09m/s (30.6km/h)，增加 24.8%，时间平均 TTC 倒数的绝对值从 2.88 增加到 3.35，增加了 16.3%。这表明期望速度的增加对交通流的安全性产生负面影响。当 B 型驾驶人的比例小于 50% 时，使用不同随机数的情况差异较大，说明车辆的顺序对时间平均 TTC 倒数产生显著的影响。可以理解为在 B 型驾驶人少于 A 型驾驶人时时，交通流的安全性具有较大的随机性。

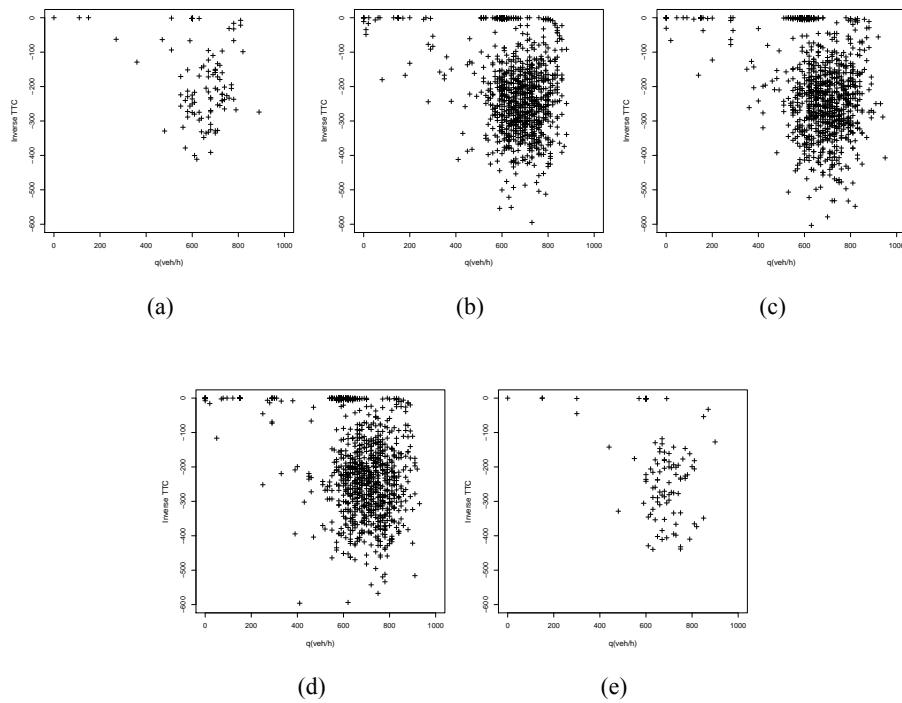


图 5.19 期望速度影响下流量与 TTC 倒数关系图 (a) (b) (c) (d) (e) 分别表示表 5.1 中的 B 型驾驶人的百分比分别为 0%, 25%, 50%, 75%, 100%，其中流量为 6 个检测器平均值，TTC 倒数为 1 分钟累计值

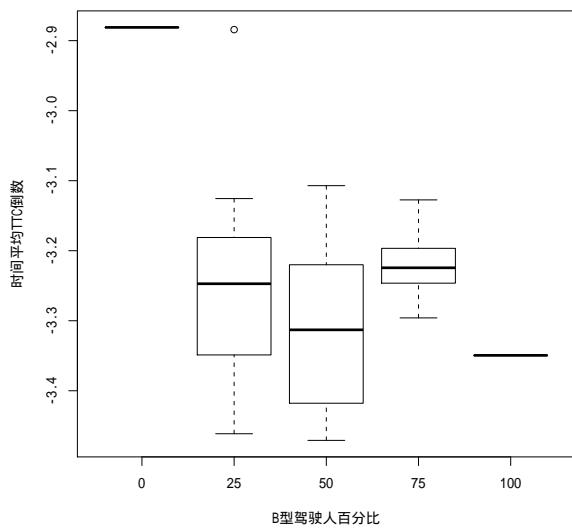


图 5.20 期望速度影响下时间平均 TTC 倒数箱图

5.4.2 最大减速度影响因素

图 5.21给出了最大减速度影响下的流量与 TTC 倒数和值关系图，图中 TTC 倒数的和值的绝对值最大主要出现在流量 600 左右，从图上看最大减速度的变化对 TTC 倒数的分布没有显著影响。图 5.22给出了最大减速度影响下流量与时间平均 TTC 倒数关系变化箱图，可以看出随着最大减速度较高的 B 型驾驶人更多的混入，时间平均 TTC 倒数的绝对值呈现先减小后增加的趋势。这似乎说明存在一个最佳的 B 型驾驶人混入比例使得 TTC 倒数的实践产生密度绝对值最小。可能的解释是，当产生速度差的扰动时，过小的减速度不利于前后车速度重新趋于同步，而过大的减速度由于驾驶人反应时间对减速程度的累计作用会增强 Over-Deceleration 效应，从而导致速度扰动的增加。

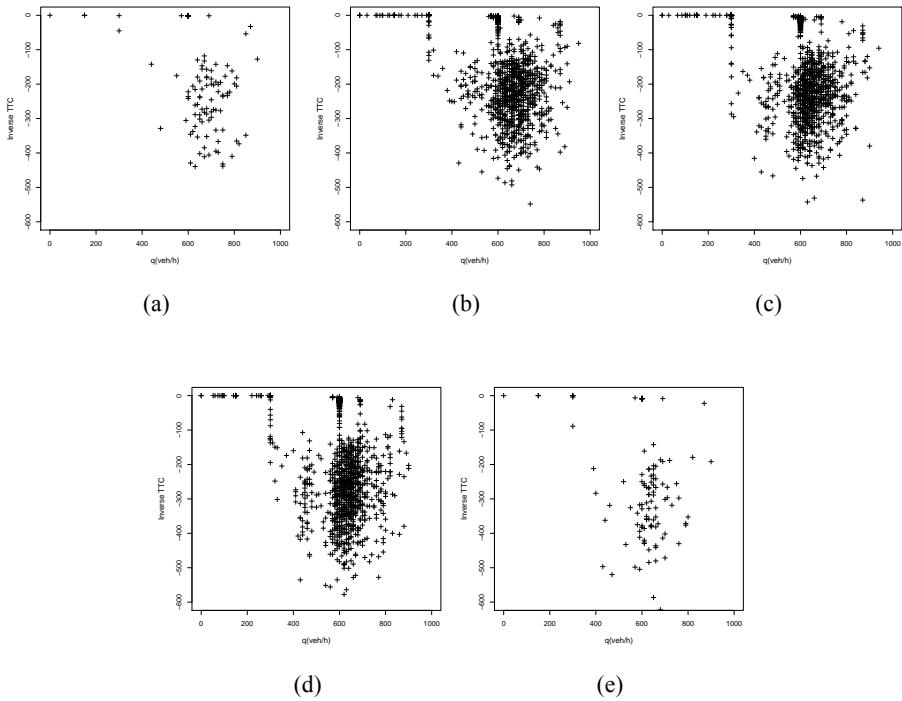


图 5.21 最大减速度影响下流量与 TTC 倒数关系图 (a) (b) (c) (d) (e) 分别表示表 5.2 中的 B 型驾驶人的百分比分别为 0%, 25%, 50%, 75%, 100%，其中流量为 6 个检测器平均值，TTC 倒数为 1 分钟累计值

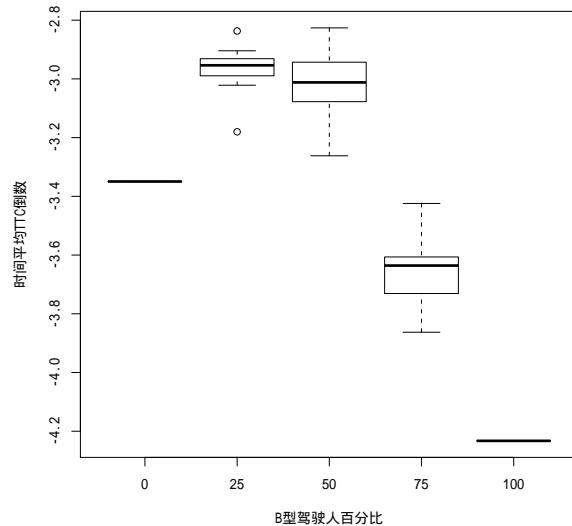


图 5.22 最大减速度影响下时间平均 TTC 倒数箱图

5.4.3 混合影响因素

图 5.23 给出了混合影响因素影响下流量与 TTC 倒数和值关系的变化情况，从图 5.23 中可以看出随着 B 型驾驶人（代表专业驾驶人）的增加，相同流量下 TTC 倒数和值的绝对值的最大值有增加的趋势，意味着交通流偏向不安全的方向。图 5.24 给出了混合影响因素作用下流量与时间平均 TTC

倒数关系变化箱图，混合作用影响下的 TTC 时间平均倒数结果与最大减速影响的结果相似，这仍表明最大减速度是交通流的主要影响因素。

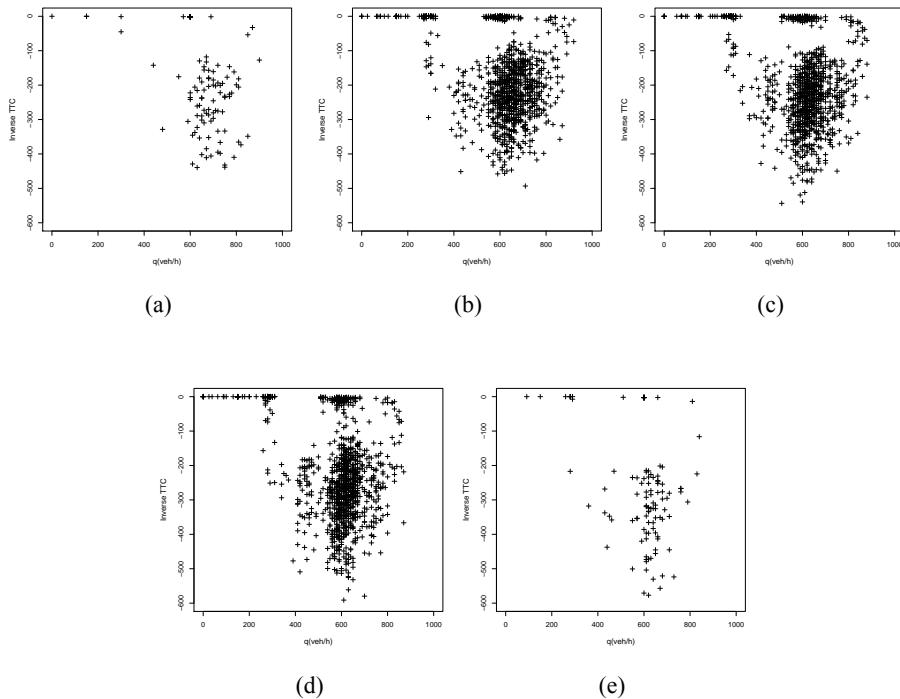


图 5.23 混合作用影响下流量与 TTC 倒数关系图 (a) (b) (c) (d) (e) 分别表示表 5.3 中的 B 型驾驶人的百分比分别为 0%, 25%, 50%, 75%, 100%，其中流量为 6 个检测器平均值，TTC 倒数为 1 分钟累计值

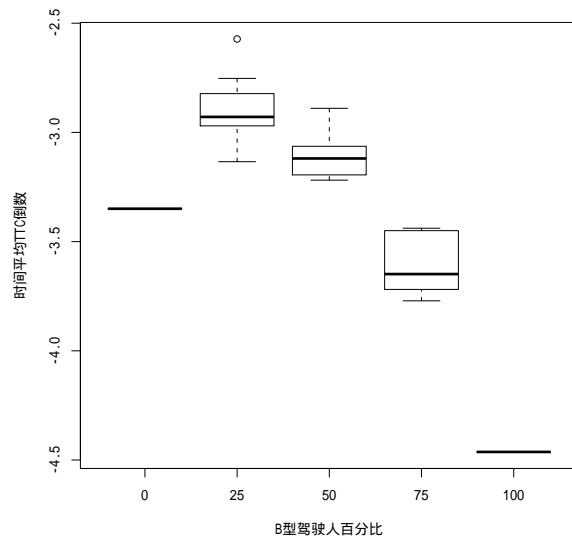


图 5.24 混合作用影响下时间平均 TTC 倒数箱图

5.5 本章小结

本章通过微观交通流模拟仿真软件 SUMO 研究了驾驶人行为特性对交通流的影响。根据第四章驾驶人行为参数的差异性结果，分别构造了不同期望速度，最大减速度以及两参数组合的不同驾驶人，以不同比例混合进行模拟，结果表明，期望车速及最大减速度对交通流的效率性及安全性存在不同特点和程度的影响，而主要的影响因素是驾驶人的最大减速度。

第六章 结论与展望

本文在假设专业与非专业驾驶人驾驶行为存在差异的基础上，通过自行设计的实验，收集了大量的数据，分析了专业驾驶人与非专业驾驶人驾驶行为特性的异同，并通过微观模拟仿真的方法研究了驾驶人行为特性对交通流的可能影响。

6.1 主要成果和结论

6.1.1 研究方法

设计并应用车载激光测距仪、车载 GPS 卫星定位系统、摄像机同步实时监测实验车辆的驾驶人行为特性关键指标，获取大量真实有效的实验数据。获得了跟车实验的大概的有效数据获取率为 40%，为进一步研究提供了数据量的参考。

给出了使用跟驰模型参数标定和 Bootstrap 方法估计驾驶人参数的方法框架，以及通过模拟分析驾驶行为特性对交通流影响的思路。

6.1.2 关于驾驶人行为特性的发现

研究表明，驾驶人所采取的减速度与 TTC 倒数呈现较为明显的线性关系，驾驶人在加减速方面存在不对称性。

专业和非专业两组驾驶人的跟驰与自由流临界点特性方面存在差异。通过参数标定表明，驾驶人在期望速度和最大减速度方面存在差异。

6.1.3 驾驶人行为特性对交通流的影响

最小通行能力似乎取决于所有驾驶人中的最低期望车速。期望车速对基本图上的速度流量曲线的形状产生影响，且主要在自由流阶段。

高期望速度导致 TTC 倒数绝对值的时间密度增加，低期望车速驾驶人混入少于高期望车速驾驶人时，TTC 倒数绝对值的时间密度变化较大。

最大减速度的增加，导致密度流量图上较难达到通行能力的区域，且在 J 线以上较为不稳定的同步流状态。

最大减速的增加导致总模拟时间有增加的趋势。少量高最大减速度的驾驶人的混入时，即使模拟时间较大增加，并且模拟时间的变化范围较大。

对于具有不同最大减速度的驾驶人，似乎存在最佳的混合比例使得 TTC 倒数绝对值的时间密度最小。

混合作用影响下随着 B 型驾驶人（代表专业驾驶人）的增加，TTC 倒数的绝对值的最大值在相同流量下有增加的趋势，表明相同流量下专业驾驶人的增加导致交通流偏向不安全的方向。

期望速度与最大减速度共同影响时，最大减速度影响的效应占了主要成分，表明相比期望速度最大减速度是影响交通流关键的因素。

6.2 研究展望

由于本文收集的驾驶人数据量，就驾驶人个数而言还较小，这导致样本的代表性存在不足，例如样本中女性驾驶人较少。样本中专业组和非专业组驾驶人除了在驾驶经验方面存在差异之外在平均年龄上也存在差异，因此驾驶行为的差异可能不是由于驾驶经验的差异导致的。本文中由于实验条件的限制未对变道行为进行更多讨论。

可以考虑改进研究设备，例如增加激光测距仪的光线条数来获取变道行为的数据。要获得更确定性的结论，应当对更多涉及范围更广的驾驶人进行更长时间的研究。可以考虑使用其他模型或者通过实际测试的方法来验证驾驶人行为特性对交通流的影响。

致 谢

感谢我的父母对我的教育，谢谢你们对我的宽容和信任。感谢我的母亲对我学业的支持。感谢我的指导老师陆建教授。感谢陆老师在学术上，生活中对我的关心与指导。论文的完成得到陆老师无微不至的关心与指导，从论文的开题、实验的设计、仪器的准备到具体的研究工作，无不倾注了陆老师大量的心血。感谢姜军师兄和胡武林同学在项目实践与论文研究中的指导与帮助。感谢王炜院长、过秀成老师、陈学武老师、任刚老师、陈峻老师、邓卫老师、李文权老师、陈琳老师、项乔君老师、王昊老师、杨敏老师，在东南大学的求学岁月里，教给了我专业知识以及探求知识的方法，感谢梁衡弘老师在研究设备方面给予的帮助。感谢课题组的胡晓健老师、孙祥龙师兄、赵勇同学、周成彦同学、李文华同学、杜璇同学对我的支持与照顾，感谢舍友王清华，余文斌同学对我的帮助与关怀。

参考文献

- 1 Kou C C. Development of a methodology for modeling ramp driver behavior during freeway merge maneuvers[D]:[PhD Thesis]. TX,United States: The University of Texas at Austin, 1997.
- 2 Heaslip I, K. Modeling driver behavior in work zones: An evaluation of traffic flow impacts in freeway work zones with full lane closures[D]:[PhD Thesis]. MA,United States: University of Massachusetts Amherst, 2007.
- 3 Xu F. Driver behavior and gap acceptance studies at roundabouts[D]:[PhD Thesis]. NV, United States: University of Nevada, Reno, 2007.
- 4 Said D. Development of the interrelationship between driver behaviour and highway design and safety[D]:[PhD Thesis]. Ottawa, Canada: Carleton University (Canada), 2008.
- 5 孔繁森. 驾驶员行为的 Kuipers 定性仿真算法 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(1):118--121.
- 6 Yang L. Driver speed and acceleration behaviour on Canadian roads[D]:[PhD Thesis]. Ottawa, Canada: Carleton University (Canada), 2008.
- 7 张开冉. 新驾驶员反应特性分析 [J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(8):115--118.
- 8 王晶. 基于驾驶员性别的城市快速路跟驰模型研究 [D]:[Master's Thesis]. 北京: 北京工业大学, 2008.
- 9 徐上. 驾驶人员驾驶特性及对路段通行能力的影响研究 [D]:[Master's Thesis]. 南京: 东南大学, 2009.
- 10 Toledo T, Koutsopoulos H N, Ben-Akiva M. Integrated driving behavior modeling[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2007, 15(2):96--112.
- 11 Oliver N, Pentland A P. Driver behavior recognition and prediction in a SmartCar[J]. Enhanced and Synthetic Vision 2000, 2000, 4023:280--290. Times Cited: 2 Verly, JG Conference on Enhanced and Synthetic Vision 2000 Apr 24-25, 2000 Orlando, fl.
- 12 邱凌云. 基于 Agent 的驾驶员 - 车辆建模研究与实现 [J]. 计算机仿真, 2005, 22(11):222--225.
- 13 Salvucci D D. Modeling Driver Behavior in a Cognitive Architecture[J]. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 2006, 48(2):362--380.
- 14 杨新月. 基于认知活动链的驾驶员行为建模及仿真 [D]:[Master's Thesis]. 山东: 山东理工大学, 2006.

- 15 许骏. 基于 Markov 决策过程的驾驶员行为模型 [J]. 汽车工程, 2008, 30(1):14--16.
- 16 王晓原. 基于决策树的驾驶行为决策机制研究 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(2):415--419.
- 17 Hamdar S. Modeling driver behavior as a stochastic hazard-based risk-taking process[D]:[PhD Thesis]. IL,United States: Northwestern University, 2009.
- 18 雷丽. 交通流的一维元胞自动机敏感驾驶模型 [J]. 物理学报, 2003, 52(9):2121--2125.
- 19 葛红霞 ,祝会兵. 智能交通系统的元胞自动机交通流模型 [J]. 物理学报, 2005, 54(10):4621--4626.
- 20 李启朗. 驾驶员的驾驶特性对交通流的影响 [J]. 广西科学, 2006, 13(1):27--30.
- 21 Farzaneh M, Rakha A, Hesham. Impact of Differences in Driver-Desired Speed on Steady-State Traffic Stream Behavior[J]. Transportation Research Record, 2006, 1965(1965):142--151.
- 22 H. B. ZHUS Q D, H. X. GE. A New Cellular Automaton Model for Traffic Flow with Different Probability for Drivers[J]. International Journal of Modern Physics C, 2007, 18(5):773--782.
- 23 Zhu H B, Dai S Q. Analysis of car-following model considering driver's physical delay in sensing headway[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2008, 387(13):3290--3298.
- 24 Ossen S. Longitudinal driving behavior: theory and empirics[D]:[PhD Thesis]. Delft, Netherlands: Technische Universiteit Delft, 2008.
- 25 祝会兵. 基于驾驶行为细致分析的交通流建模和模拟 [D]:[PhD Thesis]. 上海: 上海大学, 2008.
- 26 Kesting A, Treiber M, Helbing D. Enhanced intelligent driver model to access the impact of driving strategies on traffic capacity[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical,Physical and Engineering Sciences, 2010, 368(1928):4585--4605.
- 27 Hranac R, Gettman D, Toledo T, et al. NGSIM: Core Algorithms Assessment[R]. United States: Federal Highway Administration, 2004.
- 28 Chandler R E, Herman R, Montroll E W. Traffic Dynamics: Studies in Car Following[J]. Operations Research, 1958, 6(2):pp. 165--184.
- 29 Gazis D C, Herman R, Potts R B. Car-Following Theory of Steady-State Traffic Flow[J]. OPERATIONS RESEARCH, 1959, 7(4):499--505.
- 30 Gazis D C, Herman R, Rothery R W. Nonlinear Follow-the-Leader Models of Traffic Flow[J]. OPERATIONS RESEARCH, 1961, 9(4):545--567.
- 31 Helly W. Simulation of bottlenecks in single lane traffic flow[C]. In: Theory Traffic Flow. 1961. 207--238.
- 32 Koshi M, Kuwahara M, H.Akahane. Capacity of sags and tunnels on Japanese motorways[J]. ITE Journal, 1992, 65:17--22.
- 33 Addison P S, Low D J. A novel nonlinear car-following model[J]. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 1998, 8(4):791--799.

- 34 Low D J, Addison P S. A Nonlinear Temporal Headway Model of Traffic Dynamics[J]. *Nonlinear Dynamics*, 1998, 16:127--151.
- 35 Newell G F. Nonlinear Effects in the Dynamics of Car Following[J]. *Operations Research*, 1961, 9(2):pp. 209--229.
- 36 Bando M, Hasebe K, Nakayama A, et al. Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation[J]. *Phys. Rev. E*, 1995, 51(2):1035--1042.
- 37 Gipps P. A behavioural car-following model for computer simulation[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1981, 15(2):105--111.
- 38 Treiber M, Hennecke A, Helbing D. Congested Traffic States in Empirical Observations and Microscopic Simulations[J]. *Rev. E* 62, Issue, 2000, 62:2000.
- 39 Treiber M, Helbing D. Memory effects in microscopic traffic models and wide scattering in flow-density data[J]. *Phys. Rev. E*, 2003, 68(4):046119.
- 40 Gipps P G. A model for the structure of lane-changing decisions[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1986, 20(5):403 -- 414.
- 41 Halati A, Lieu H, Walker S. CORSIM - Corridor Traffic Simulation Model[C]. In: *Traffic Congestion and Traffic Safety in the 21st Century: Challenges, Innovations, and Opportunities*. 1997. 570--576.
- 42 Yang Q, Koutsopoulos H N. A Microscopic Traffic Simulator for evaluation of dynamic traffic management systems[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 1996, 4(3):113 -- 129.
- 43 Ahmed K, Moshe E, Koutsopoulos H, et al. Models of freeway lane changing and gap acceptance behavior[C]. In: *International symposium on transportation and traffic theory*. 1996.
- 44 Ahmed K I. Modeling drivers' acceleration and lane changing behavior[D]:[PhD Thesis]. MA,United States: Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- 45 Ben-Akiva M. C C, Toledo T. Lane-changing Models[C]. In: *2nd International Symposium of Transport Simulation*. 2006.
- 46 Kita H. Effects of merging lane length on the merging behaviour at expressway on-ramps[C]. In: Daganzo, C. (Ed.),*Proceedings of the 12th International Symposium on the Theory of Traffic Flow and Transportation*. 1993. 37--51.
- 47 Kesting A, Treiber M, Helbing D. General Lane-Changing Model MOBIL for Car-Following Models[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2007, 1999(-1):86--94.
- 48 Herman R, Montroll E W, Potts R B, 等. Traffic Dynamics: Analysis of Stability in Car Following[J]. *Operations Research*, 1959, 7(1):pp. 86--106.
- 49 Forbes T. Human factor consideration in traffic flow theory[J]. *Highway Research Record*, 1963, 15:60--66.

- 50 Foote R. Single lane traffic flow control[C]. In: Proceedings of the Second International Symposium on the Theory of Road Traffic Flow. 1965. 84--103.
- 51 Newell G. Instability in dense highway traffic, a review[C]. In: Proceedings of the Second International Symposium on Transportation and Traffic Theory. 1965. 73--83.
- 52 Thiemann C, Treiber M, Kesting A. Estimating Acceleration and Lane-Changing Dynamics from Next Generation Simulation Trajectory Data[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2008, 2088(2088):90--101.
- 53 MacAdam E R C, Walker J, Bogard S, et al. System for Assessment of the Vehicle Motion Environment (SAVME): volume II[R]. Michigan, Ann Arbor: Transportation Research Institute, University of Michigan, Ann Arbor, 2000.
- 54 Punzo V, Borzacchiello M T, Ciuffo F, Biagio. Estimation of Vehicle Trajectories from Observed Discrete Positions and Next-Generation Simulation Program (NGSIM) Data[C]. In: Transportation Research Board 88th Annual Meeting. 2009. 17p.
- 55 Toledo T, Koutsopoulos N, Haris, Ahmed I, Kazi. Estimation of Vehicle Trajectories with Locally Weighted Regression[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2007, 1999:pp 161--169.
- 56 Cleveland W S. Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots[J]. Journal of the American Statistical Association, 1979, 74:829--836.
- 57 Vogel K. What characterizes a "free vehicle" in an urban area?[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2002, 5(1):15 -- 29.
- 58 Xin W, Hourdos J, Michalopoulos P, et al. The Less-Than-Perfect Driver: A Model of Collision-Inclusive Car-Following Behavior[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2008, 2088(-1):126--137.
- 59 Hayward J. Near miss determination through use of a scale of danger[R]. United States: The Pennsylvania State University, 1972.
- 60 Lee D. A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision.[J]. Perception, 1976, 5(4)(0301-0066 (Linking)):347--59.
- 61 Balas V, Balas M. Driver Assisting by Inverse Time to Collision[C]. In: Automation Congress, 2006. WAC '06. World. 2006. 1--6.
- 62 WR Mebane J, Jr., Sekhon J S. Genetic Optimization Using Derivatives: The rgenoud Package for R[J]. Journal of Statistical Software, 2009, Forthcoming:1. Forthcoming.
- 63 Greene W H. Econometric Analysis[M]. 6. Vol. 97. New Jersey, USA: Prentice Hall, 2000: 1--1004.
- 64 Efron B. Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife[J]. The Annals of Statistics, 1979, 7(1):pp. 1--26.

- 65 Kesting A, Treiber M. Calibrating Car-Following Models by Using Trajectory Data: Methodological Study[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2008, 2088:148--156.
- 66 Krajzewicz D, Bonert M, Wagner P. The open source traffic simulation package SUMO[C]. In: RoboCup 2006. 2006.
- 67 Krajzewicz D, Hartinger M, Hertkorn G, et al. Using the Road Traffic Simulation “SUMO” for Educational Purposes[M]//. In: *Traffic and Granular Flow 03*. Netherlands: Springer Berlin Heidelberg, 2005. 217--222.
- 68 Krauß S. Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics[D]:[PhD Thesis]. Cologne, Germany: Mathematisch – Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität zu Köln, 1998.
- 69 S.Kerner B. Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control[M]. Berlin: Springer Berlin / Heidelberg, 2009.
- 70 Schönhof M, Helbing D. Criticism of three-phase traffic theory[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2009, 43(7):784--797.
- 71 Kerner B S, Rehborn H. Experimental properties of complexity in traffic flow[J]. *Phys. Rev. E*, 1996, 53(5):R4275--R4278.
- 72 Kerner B S, Rehborn H. Experimental features and characteristics of traffic jams[J]. *Phys. Rev. E*, 1996, 53(2):R1297--R1300.
- 73 Kerner B S, Rehborn H. Experimental Properties of Phase Transitions in Traffic Flow[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, 79(20):4030--4033.
- 74 Kerner B S. Experimental Features of Self-Organization in Traffic Flow[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, 81(17):3797--3800.
- 75 Kerner B S. *The Physics of Traffic*[M]. Berlin: Springer Berlin / Heidelberg, 2004.

附录 A 受调查驾驶人基本情况

编号	性别	年龄	驾照类型	驾龄(年)	累计行驶里程(万公里)	是否专业驾驶人
1	女	25	C1	0	0.0	否
2	男	23	C1	1	0.5	否
3	男	26	C1	4	2.0	否
4	女	24	C1	2	NA	否
5	男	24	C1	4	0.6	否
6	男	26	C1	5	1.0	否
7	男	26	C1	4	0.5	否
8	男	23	C1	4	0.2	否
9	男	24	C1	5	1.5	否
10	男	24	C1	3	1.0	否
11	男	28	C1	1	0.5	否
12	男	25	C1	1	0.8	否
13	女	24	C1	3	2.5	否
14	男	24	C1	2	2.0	否
15	男	29	C1	5	NA	否
16	男	25	C1	4	15.0	否
17	男	39	NA	3	24.0	是
18	男	44	A	11	90.0	是
19	男	37	A	10	NA	是
20	男	33	B	16	30.0	是
21	男	43	B	6	60.0	是
22	男	45	A	23	200.0	是
23	男	NA	A	10	50.0	是
24	男	50	NA	14	15.0	是
25	男	53	NA	18	60.0	是
26	男	47	A	15	76.0	是

作者简介 (包括论文和成果清单)

发表论文情况

- [1] Desired Following Distance of Chinese Drivers.2011 TRB Annual Meeting. 第三作者
- [2] Discerning Free Driving from Car Following State Based on Trajectory Data from Active Mode Car-Following Experiment.Accepted by ICCTP 2011. 第一作者

参与项目情况

项目名称	参与时间	参与程度
蚌埠市立交用地控制设计	2008.8—2008.11	主要参与
第十一届全国运动会大型活动交通组织	2009.3—2009.10	主要参与
海峡两岸经济区公路网优化	2010.3—2010.8	主要参与
张家港市“十二五”综合交通规划	2010.3—2010.8	主要参与

心於至善

