

驾驶行为分类方法及量化评估综述*

张立成^{1,2,3} 张婷^{1,3} 蔡学锐^{1,3} 赵祥模^{1,2,3} 彭琨^{1,3}

(1.长安大学,西安 710064;2.车联网教育部-中国移动联合实验室,西安 710064;3.陕西省车联网与智能汽车测试技术工程研究中心,西安 710064)

【摘要】对驾驶行为分类方法及量化评估进行综述,首先阐述了驾驶行为的涵义及表征方法,然后将驾驶行为分类方法划分为基于统计特性的分类方法、基于机器学习的分类方法、混合式(组合、集成)分类方法三大类,并对不同的驾驶行为分类方法的代表算法、优点及局限性等进行系统归纳和总结,其次,从多个维度对驾驶行为的量化评估研究进行系统介绍,最后介绍了驾驶行为分类及量化评估研究成果在多个领域的应用现状及前景展望。

关键词:交通工程 驾驶行为分类评估 智能网联汽车 交通安全 节能减排 舒适性

中图分类号:U461.9;U471 **文献标志码:**A **DOI:** 10.19620/j.cnki.1000-3703.20230028

Review of Classification Methods and Quantitative Evaluation of Driving Behavior

Zhang Licheng^{1,2,3}, Zhang Ting^{1,3}, Cai Xuerui^{1,3}, Zhao Xiangmo^{1,2,3}, Peng Kun^{1,3}

(1. Chang'an University, Xi'an 710064; 2. The Joint Laboratory for Internet of Vehicles of Ministry of Education - China Mobile Communications Corporation, Xi'an 710064; 3. Shaanxi Engineering Research Center of Internet of Vehicles and Intelligent Vehicle Testing Technique, Xi'an 710064)

【Abstract】This study provided a review of classification methods and quantitative evaluation of driving behavior, which firstly expounded the meaning and representation methods of driving behavior, and divided the driving behavior classification methods into three categories: statistics based classification method, machine learning based classification method, and the hybrid (combination, integration) classification method. Different driving behavior classification methods were summarized from the aspects of representative algorithms, advantages and limitations. Secondly, the quantitative evaluation research of driving behavior was systematically described from multiple dimensions. Finally, the application status and prospect of driving behavior classification and quantitative evaluation results in many fields were introduced.

Key words: Traffic engineering, Driving behavior classification and evaluation, Intelligent and connected vehicle, Transportation safety, Energy saving and emission reduction, Comfort

【引用格式】张立成,张婷,蔡学锐,等.驾驶行为分类方法及量化评估综述[J].汽车技术,2024(5):1-14.

ZHANG L C, ZHANG T, CAI X R, et al. Review of Classification Methods and Quantitative Evaluation of Driving Behavior [J]. Automobile Technology, 2024(5): 1-14.

1 前言

近年来,随着我国汽车工业的快速发展,全国汽车保有量呈不断增加态势。数据显示,从2014年至2023年,我国汽车保有量从1.54亿辆增加到3.36亿辆,增长118.2%^[1]。汽车在给人们生活带来便利的同时,也造成

了交通安全、能源短缺、环境污染等一系列问题。国家统计局数据显示,2023年中国道路交通事故万车死亡人数为1.38人^[2]。同时,道路运输业是能源消耗重点行业,每年消耗大量的石化资源,也造成了严重的环境污染,2023年《中国移动源环境管理年报》显示,2022年全国机动车四项污染物排放总量达1 466.2×10⁴ t,其

*基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0105104);国家自然科学基金项目(51278058);“车-路信息感知与智能交通系统”

111 高校创新引智基地项目(B14043);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CHD300102240503, CHD300102242502)。

通信作者:赵祥模(1966—),男,教授,工学博士,主要研究方向为车联网与智能网联汽车测试技术、车路协同与自动驾驶技术、汽车综合性能智能检测技术等,xmzhao@chd.edu.cn。

中,一氧化碳(CO)、碳氢化合物(HC)、氮氧化物(NO_x)和颗粒物(PM)排放量分别为743.0×10⁴ t、191.2×10⁴ t、526.7×10⁴ t和5.3×10⁴ t。汽车是污染物排放的主要贡献者,CO、HC、NO_x、PM排放量超过90%^[3]。为缓解上述问题,相关部门一直致力于道路环境的改善、车辆结构的优化、驾驶人的交通安全教育等客观方面的研究,并取得了不错的成绩。然而,这些治理手段已经进入瓶颈期。随着智能网联技术的不断发展,驾驶行为优化评估为解决上述问题提供了新的思路。

驾驶员不仅是道路交通系统的信息处理者、决策者,也是调节者和控制者,是人-车-路闭环系统中最为关键的因素,其驾驶行为直接影响道路交通安全水平。研究表明,驾驶员不当操作所导致的交通事故占80%~90%,造成交通事故死亡人数占86.5%^[4]。另外,驾驶行为对车辆能耗和排放也有显著影响,若驾驶员采用合理的驾驶行为进行操作,可使汽车燃料消耗降低25%左右,同时可使污染物排放量大幅度减少^[5]。

对驾驶行为的研究,已成为道路交通安全及生态驾驶研究的核心内容。本文从驾驶行为分类和量化评估两个方面进行综述:首先,基于不同的驾驶行为分类方法,将其分为基于统计学的分类方法、基于机器学习的分类方法、混合式(组合、集成)分类方法三大类,并分别进行详细划分,系统地总结和梳理不同的驾驶行为分类方法;然后,从安全性、经济性、舒适性等多个维度对驾驶行为量化评估研究进行系统介绍。

2 驾驶行为涵义和表征

2.1 驾驶行为涵义

驾驶行为描述了驾驶员如何在驾驶场景和周围环境中操纵车辆,即驾驶员操作机动车过程中的综合表现,包括感知外界交通信息并形成决策的思维、通过运动器官操纵车辆运行的肢体行为及自身车辆与周围车辆等交通环境要素之间的相对运动关系的控制行为^[6]。如图1所示,按照层次逻辑关系,驾驶行为可以分为驾驶决策和驾驶操作两部分。驾驶决策是指驾驶员根据周围的环境信息和车辆信息进行分析判断,并选择合适的驾驶工况,如速度控制(加速、减速、巡航)、超车、变道、转弯、停车等。驾驶操作是指驾驶员对车内控制设备进行操作以改变或者保持车辆状态的过程^[7],常见的操作包括踩油门、踩离合器、踩制动踏板、换挡、转转向盘、调整车灯等。根据驾驶员个体的不同,驾驶行为由

驾驶技能和驾驶风格共同决定。驾驶技能是指车辆行驶过程中驾驶员对车辆稳定性控制的能力,因此构成了驾驶员在驾驶任务要素上的最大表现水平。驾驶风格涉及驾驶员的态度和性格,具体是指个人选择或习惯性驾驶的风格,包括驾驶速度的选择、超车的阈值和交通违章的倾向等^[8]。

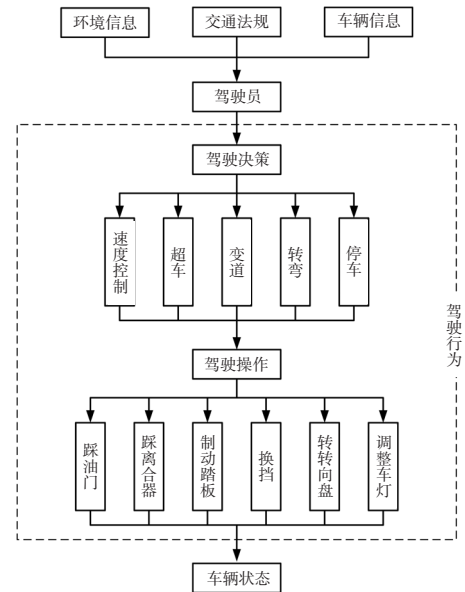


图1 人-车-路闭环系统中的驾驶行为

此外,根据不同的研究角度和研究内容,也可以将驾驶行为分成宏观和微观两大类^[9]。宏观驾驶行为为主要研究影响驾驶安全的行为特征,包括对超速、分心、疲劳、饮酒等行为的成因及其影响机制的研究,并建立宏观驾驶行为表征指标体系,对驾驶行为进行评价等。此类研究成果可为相关部门提供管控依据,以减少交通事故。微观驾驶行为主要研究不同工况下驾驶员进行的具体操作对交通系统产生的影响,如变道、超车、跟驰等微观行为。此类研究成果可为提高道路通行效率、完善路网规划体系及管控系统参数等提供依据。

2.2 驾驶行为表征方法

驾驶员的驾驶过程按信息加工处理流程可分为3个主要阶段^[10],如图2所示。其中:第一阶段为信息感知与处理;第二阶段是信息决策和驱动操作;第三阶段是车辆运行和信息反馈。

为研究驾驶操作的行为变化特征,交通领域学者根据各阶段的特征提出了驾驶行为表征指标。其中,第一阶段获取用于表征驾驶员特征的车辆运行信息;第二阶段建立描述驾驶员对各种信息的认知态度和反应能力的指标;第三阶段指明操作动作和车辆运动特性,即驾驶行为的具体表现。

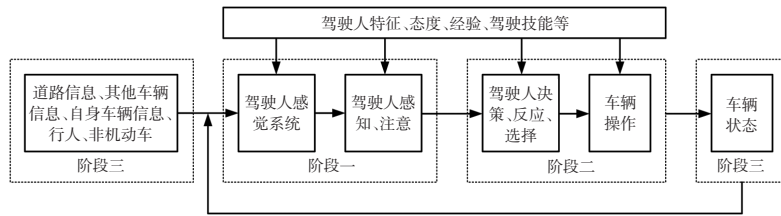


图2 驾驶过程的主要阶段

3 驾驶行为分类方法

3.1 基于统计特性的分类方法

基于统计特征的分类方法在驾驶行为分类研究中应用甚广,大部分文献围绕驾驶员的驾驶风格进行研究。其中,激进驾驶及其对交通安全的影响一直是公众和许多其他部门关注的问题,包括公共交通机构、政策机构、保险公司、汽车协会等。激进驾驶并没有明确的定义,研究人员从不同角度对其进行分类。例如,社会心理学研究人员从意图的角度来定义激进驾驶^[11]。随着大数据技术的发展,研究人员可采集到大量的瞬时驾驶信息参数,并从中发现激进驾驶行为的规律。Paleti等人^[12]通过探索激进的碰撞行为来定义激进驾驶,其行为包括“加速超车、频繁更换车道和切换闪光灯来阻碍他人行驶、忽视交通控制设备导致突然加速和减速”。以上研究显示,伤害严重程度(发生车祸)与激进驾驶之间存在正相关关系。

近年来,也有一些学者致力研究基于速度、加速度、加加速度(Jerk)等瞬时驾驶参数的统计特性来进行激进驾驶行为分类,并取得了不错的成果。Eboli等人^[13]通过对速度和加速度定义安全阈值来衡量驾驶行为的安全性,即测量速度和加速度,如果在阈值范围内则认为驾驶行为处于安全状态,若超过阈值则认为驾驶行为是不安全的。Langari、Won^[14-15]通过在指定窗口内使用从加速度剖面中提取的标准差和平均加速度之比对驾驶员行为进行分类,如果比例大于100%,则认为驾驶员风格激进,如果在50%~100%之间,则认为驾驶员风格正常,如果小于50%,则认为驾驶员风格冷静。当然,也有研究给出了不同的激进驾驶行为阈值。例如,Vlieger、Kim、Kim等人^[16-18]给出了城市道路中的激进驾驶行为阈值。近年来,除了基于加速度外,加加速度也被用于激进驾驶行为的分类。Yi^[19]等在考虑道路类型和交通拥挤程度的基础上,基于Jerk的标准差和均值之比将驾驶行为分为冷静驾驶(Calm Driving)、正常驾驶(Normal Driving)、激进驾驶(Aggressive Driving)等。Wang^[20]等通过车载GPS设备收集3 600×10⁴ s数据(包含51 370次行程及对应的逐秒速度),分别基于加速度和Jerk,将超出

不稳定驾驶边界的数据点占总数据点的比例作为不稳定驾驶行为的量化指标,并将不稳定驾驶边界定义为加速度或Jerk的均值加/减各自的标准差,在此边界内的点被称为典型驾驶行为(Typical Driving Practices),界外的点被称为不稳定驾驶行为(Volatile)。

具体地,利用加速度的均值和标准差对驾驶行为进行分类,如图3所示。以加速度为正为例:图中黑色部分表示加速度大于最小值、小于均值的所有速度点,这个区域内的点表示较为冷静的驾驶行为(Calm);深灰色部分表示加速度大于均值、小于“均值+标准差”的所有速度点,这个区域的点表示一般的驾驶行为(Normal);浅灰色部分表示加速度大于“均值+标准差”的所有速度点,该区域表示激进的驾驶行为(Aggressive)。

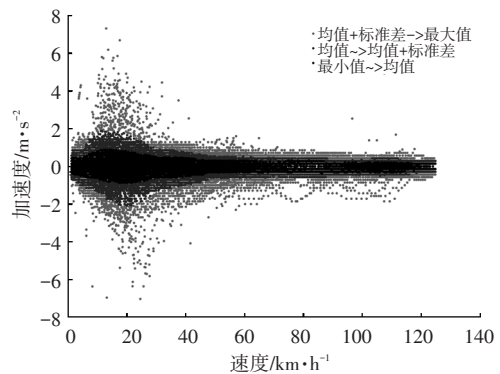


图3 加速度与速度分布

利用Jerk的均值和标准差进行驾驶行为分类,如图4所示。以Jerk为正为例:黑色部分表示Jerk大于最小值、小于均值的所有速度点,这个区域内的点表示较为冷静的驾驶行为(Calm);深灰色部分表示Jerk大于均值、小于均值+标准差”的所有速度点,这个区域的点表示一般的驾驶行为(Normal);浅灰色部分表示Jerk大于“均值+标准差”的所有速度点,该区域表示激进的驾驶行为(Aggressive)。

Mohsen^[21]等将标准差、变异系数、围绕中心点的平均绝对偏差、四分位变异系数、极值计数等37项参数作为统计度量,研究速度波动性和交叉路口车辆碰撞频率的关系。研究表明,驾驶波动性的三个指标与十字路口碰撞频率具有正相关性,且在统计学上显著。研究发现,更多的十字路口碰撞与基本安全消息(Basic Safety

Messages, BSM)速度和加速度数据点的百分比的相关性更高,这些数据点位于十字路口使用平均值加两个标准偏差创建的阈值带之外,可为进一步的交通安全管控提供依据。

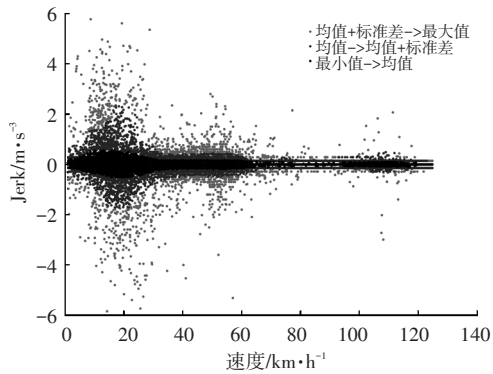


图4 Jerk与速度分布

综上,因激进的驾驶行为对交通安全、燃油经济性及乘坐舒适性影响较大,基于统计特性的驾驶行为分类方法主要使用均值、标准差等统计度量对驾驶行为的激进程度进行分类。而驾驶行为主要通过车速、加速度和Jerk定量表征,将抽象的驾驶行为分类问题转化为速度、加速度和Jerk等随机变量的数理统计问题,为激进驾驶对交通安全、能耗及舒适性影响的研究奠定基础。速度、加速度、Jerk等都是与时间相关的连续、随机变量,在实际交通场景中,这些驾驶行为表征量具有时间轴上的先后性和数值空间上的随机性。然而,基于统计特性的驾驶行为分类方法保留了以速度、加速度、Jerk为主要表征的驾驶行为的时空随机性特征,将其视为离散随机变量进行数据处理,忽视了时间序列上的逻辑关系,未能很好地揭示多因素下的驾驶行为成因机理及其时空演化规律。针对考虑驾驶行为形成机理及时空演化规律的驾驶行为分类将是本领域亟需解决的难点和痛点问题。

3.2 基于机器学习的分类方法

随着大数据时代的到来,数据的丰富度和覆盖面已经远远超出了人工可以观察和总结的范畴,结合了统计学、数据库科学和计算机科学的机器学习已经成为人工智能和数据科学发展的主流方向之一,机器学习技术迅速发展。机器学习可以从海量的数据中分析出数据的规律,并利用规律对未知数据进行预测,广泛应用于多个领域。根据学习任务的不同,可以把机器学习算法分为分类(Classification)、回归(Regression)、聚类(Clustering)三类。利用机器学习中的分类算法和聚类算法对驾驶行为进行分类是国内外学者研究的热点,本节将从这两个方面对驾驶行为分类研究进行介绍,并概述典型算法。

3.2.1 分类算法

基于机器学习分类算法的驾驶行为分类是在大量车辆数据信息中挖掘与驾驶行为相关的重要特征,并找出输入特征与驾驶行为类别之间的映射关系。其中,常用于分类的机器学习算法有:决策树(Decision Tree, DT)算法、朴素贝叶斯(Native Bayesian Classifier, NBC)算法、支持向量机(Support Vector Machine, SVM)算法、K近邻(K-Nearest Neighbor, K-NN)算法、神经网络算法等。

在实际的车辆驾驶过程中,驾驶员的行为会受到多方面因素的干扰,每一种驾驶行为都有各自的特点,为了将驾驶行为划分为不同的类别,需要使用合适的特征来区分每一种驾驶行为类别。因此,从多个影响因素提取出最主要、最有价值的特征,作为驾驶行为分类依据,能够更好地构建驾驶行为分类模型。高岩^[22]基于车联网数据,利用ExtmTrees算法进行驾驶行为分类的特征选择,通过对比5种机器学习分类算法(DT、NBC、K-NN、神经网络、SVM),得出基于SVM分类器的驾驶行为分类模型的性能最优,并利用粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法和遗传算法(Genetic Algorithm, GA)对模型参数加以优化。Silva等人^[8]通过车载设备采集真实数据,选用人工神经网络(Artificial Neural Networks, ANN)、SVM、K-NN等机器学习算法模型对平静、正常、具有攻击性的驾驶风格进行分类,试验结果表明,SVM模型在驾驶行为分类方面性能最好,准确率高达96%,但由于数据集样本数量较少,没有考虑影响驾驶方式的外部因素,迁移能力较差。杨鸿飞^[23]基于车辆保险(Usage Based Insurance, UBI)及道路交通事故特征,采用相关性及多重共线性检验获取分类特征,通过PSO算法优化BP神经网络的方式建立驾驶行为分类模型。Brombacher等^[24]基于ANN算法,将检测到的纵向和横向驾驶事件分为Defensive和Sporty两大类,接着依据事件分类计算出驾驶风格分类总体得分,将驾驶风格分为五类。除了少数情况下,即当无法检测到足够的事件,或者驾驶员必须根据交通堵塞中的环境调整其驾驶方式时,该分类模型均能实现高精度的分类。

驾驶员在道路上的行为与交通安全息息相关,因此,部分研究者针对驾驶行为安全问题也进行了相应的研究,Lattanzi等人^[25]通过用传感器提取车速、发动机转速、发动机负载、油门位置、转向盘角度、制动踏板压力等数据,并将此作为分类特征,采用支持向量机和前馈神经网络两种分类方法来区分安全和不安全的驾驶行

为,结果显示,两种分类器的平均准确率均超过90%。Niu等人^[26]主要对不安全驾驶行为进行研究,从驾驶员信息、车辆信息、驾驶员心理状态、企业安全管理、道路环境、法律法规等6个维度出发,分析了影响安全驾驶行为的因素,并采用卡方检验和OR检验探索了影响因素与驾驶行为的相关性,利用机器学习模型建立了不安全驾驶行为分类框架,将其分为酒驾、毒驾、疲劳驾驶、失误操作、闯红灯、超速、视线受阻、随机变道、开车时打电话9种不安全驾驶行为。Yuksel等人^[27]基于车辆运动数据对突然加速、突然减速、突然左转、突然右转4种危险驾驶行为进行分析,并通过ANN、SVM、K-NN、NBC和K-star算法等常见的机器学习分类算法建立分类器,进行试验对比分析,其中K-star算法在分类效果上表现最佳,可以高精度识别危险驾驶行为。

综上,基于机器学习分类算法的驾驶行为分类是在大量车辆数据信息中挖掘与驾驶行为相关的重要特征,并找出输入特征与驾驶行为类别之间的映射关系。与基于统计特性的分类方法相比较其具有强大的自学习能力,可以处理大样本复杂数据集,在特定应用场景内优于基于统计特征的分类方法。但由于分类算法属于监督学习方法,必须事先获取样本的类别信息,并进行训练,从而对包含其属性的未知样本进行分类,在不满足条件情况下,尤其是在对海量数据进行预处理时代价很大。

3.2.2 聚类算法

同时,很多研究者聚焦于通过聚类的机器学习方法实现驾驶行为分类,其思想是将驾驶行为特征参数相类似的划分为一类,将相异度较高的分成不同类。K-means算法作为最著名的基于划分的聚类算法,因其简洁和高效被广泛使用,但直接运用传统的K-means算法对驾驶行为特征参数进行聚类,会导致聚类结果不稳定。为解决此类问题,廖纪勇^[4]提出一种基于决策值选取初始聚类中心的改进K-means算法,试验表明,改进算法比传统K-means算法更加稳定,迭代次数减少,在真实数据集上聚类性能优异。基于改进算法对驾驶行为片段进行安全性分类,将驾驶行为划分为危险型、急躁型、稳定性三类,其中危险型占比18.35%,急躁型占比25.65%,稳健性占比56%。陈辉^[28]基于K-means++算法对驾驶行为特征参数进行聚类分析,将驾驶行为分为一般型、激进型、稳健型三类,其中激进型驾驶者占比为15.8%,一般型驾驶者占比为36.4%,稳健型驾驶者占比为47.8%。

此外,还有学者利用模糊聚类和系统聚类对驾驶行

为进行研究^[29-32],并取得了丰富的研究成果。牛增良等人^[29]以大量重特大交通事故数据为基础,从危险驾驶行为角度研究外部影响因素与驾驶行为的关系,通过模糊和系统聚类对危险驾驶行为进行分类。孙川等人^[30]通过因子分析法对选取的江苏范围内营运车辆驾驶行为特征参数进行提取,并以营运车辆相应因子的得分作为聚类指标,应用系统聚类将驾驶速度行为特征分为变速驾驶行为、超速倾向驾驶行为、减速驾驶行为、加速驾驶行为4类。张磊等人^[31]以驾驶员自填式调查问卷为基础,采用基于因子分析方法提取出驾驶能力因子和驾驶风格因子,实现了对驾驶员驾驶行为模式的量化描述。进而以提取出的因子为特征,采用模糊C均值聚类分析的方法建立了驾驶员行为模式的类别分布空间。

与前几种聚类方法不同,基于密度的聚类方法更适用于解决不规则形状的聚类问题,广泛应用于空间信息处理,DBSCAN就是其中的典型代表。李士深^[7]基于车辆速度、加速度分析,通过DBSCAN算法获取正常减速和急减速的分界值,对正常减速操作和急减速操作进行区分,并将其应用于分析特定驾驶场景中的急减速行为。DBSCAN算法效率高,非常适合处理大量的数据。

综上,基于机器学习聚类算法的驾驶行为分类是将驾驶行为特征参数相似的分为一类,相异的分为不同类。与分类算法相比,其为无监督学习,不需要训练模型,是直接根据数据之间的联系进行分类,可以处理无类别标记的大数据样本,并基于某种度量将其划分为若干类别。

常见的用于分类驾驶行为的机器学习方法及其优缺点如表1所示。

表1 面向驾驶行为分类的机器学习算法及其优缺点

机器学习算法	典型代表算法	优点	局限性
分类算法	决策树 ^[26-27]	可以对大量数据进行处理,速度快	容易忽略特征之间的相关性,易于过拟合
	支持向量机 ^[8, 22, 25]	泛化能力强,可处理高维、非线性问题	对缺失数据敏感,适合处理小样本数据,可解释性不高
	神经网络 ^[23-25]	分类模型精度高,鲁棒性较强,不易受噪声影响	受样本选取影响大,速度慢,可解释度低
聚类算法	K-means ^[4, 28]	原理简单,较易实现,可解释度较强	K值的选择可能导致聚类结果不稳定,运行时间长
	DBSCAN ^[7]	适合处理不规则形状的聚类问题,异常数据的抗干扰性较高	受样本集影响大,不适合处理高维数据,参数选择较为复杂

3.3 混合式(组合、集成)分类方法

本节所述的混合方式是指通过统计特性与机器学习方法组合或多种不同的机器学习方法组合构建分类器实现驾驶行为分类。这类混合方法往往比使用单一的机器学习方法表现更佳。

将机器学习方法组合进行驾驶行为分类的常见思路为:先用聚类算法对驾驶行为进行初始聚类,接着用不同的分类算法构建分类器。郑恒杰等人^[33]通过主成分分析法选取疲劳驾驶、超速、急加速、急减速和急变道等作为评价指标,然后通过K-means聚类算法归类并添加标签,最后通过BP神经网络构建分类器,分类结果划分为4类:安全、警告、轻度危险、危险。张雅楠^[34]以行车数据为基础,运用K-means++算法对驾驶行为进行初始聚类,聚类结果将驾驶行为分成危险型、隐患型和安全型三类,根据聚类结果,用4种常用的分类算法分别进行驾驶行为分类。根据混淆矩阵的评价指标选出分类准确度最高的方法为SVM算法,将SVM与K-means++结合作为驾驶行为分类方法。

此外,Ersal等人^[35]基于径向基(Radial Basis Function, RBF)神经网络对驾驶行为进行建模,并结合SVM形成一种仅使用残差对驾驶员分心进行分类的系统方法。Eren等人^[36]使用智能手机传感器获取事件数据,利用动态时间规整(Dynamic Time Warping, DTW)和贝叶斯分类方法区分了驾驶员的安全行为和不安全行为,并与其他方法的比较,显示出该方法在计算成本和实现成本方面具有很好的应用前景。还有部分学者针对驾驶风格和驾驶技能,通过不同的方法实现其分类。陈镜任等^[37]通过采用基于马尔可夫链蒙特卡洛采样和离群点剔除的K-means算法对驾驶人的驾驶风格进行分析,采用回归学习对驾驶人的驾驶技能进行分析,将驾驶人人群体划分为6类:激进熟练型、适中熟练型、保守熟练型、激进生疏型、适中生疏型、保守生疏型。孙剑等^[38]从自然驾驶数据集中提取典型的分心驾驶片段,利用梯度提升决策树-递归特征消除算法和随机森林-递归特征消除算法得到重要度较高的分心监测指标,采用长短时记忆神经网络(LSTM-NN)实现分心驾驶的分类识别。

混合式(组合、集成)分类方法可以取长补短,集成几种方法的优点,在特定的应用场景具有更高的分类精度。常见的用于分类驾驶行为的混合方法及其优缺点如表2所示。

3.4 分类方法对比分析

本节从各种驾驶行为特征出发,基于上述驾驶行为分类方法的小类划分思路,对驾驶行为分类研究的

特征选取、分类方法、分类结果等进行归纳介绍,如表3所示。

表2 驾驶行为分类的混合方法及其优缺点

典型代表算法	优点	局限性
SVM+K-means++ ^[34]	分类准确度高	分类精度依赖于样本集容量,计算复杂度高
K-means+线性回归 ^[37]	算法速度较快,分类结果可解释性高,利于决策分析	对于非线性数据难以建模,参数难以确定
RBF+SVM ^[35]	识别率高、分类精度高	对参数调节和核函数的选择敏感,要求数据充分
DTW+贝叶斯 ^[36]	计算和实现成本较低	样本属性有关联时其效果不佳

表3 驾驶行为分类对比分析

特征参数	分类指标	分类方法	文献	分类结果
车速(V) 加速度(A) Jerk(J) 车辆位置(P) 驾驶模式持续时间(T _m)	V、A、J	基于统计特性的分类方法	[13]~[21]	(1)安全驾驶和非安全驾驶 (2)激进驾驶、冷静驾驶、正常驾驶
超速次数(N _o) 行驶时长(T _d) 行驶里程(M) 最大连续驾驶时长(T _i) 疲劳驾驶次数(N _f) 急加速次数(N _a) 急减速次数(N _d) 急转弯次数(N _t) 紧急制动次数(N _b) 急变道次数(N _c) 早晚高峰驾驶时间(T _p)	V、A、N _o 、T _d 、M、T _i 、N _f 、N _a 、N _d 、N _t 、N _b 、T _p 、T _w 、R _d 、R _{d1} 、R _{d2} 、N _c 、S _b 、R、A _w 、P _p 、L _r	基于机器学习的分类方法	[4][7][8][22]~[28][30][31]	(1)危险型、急躁型、稳定型 (2)一般型、激进型、稳健型 (3)激进稳定型、保守稳定型、保守不稳定型、激进不稳定型和一般型
夜间行车时间(T _n) 周末行车时间(T _w) 80~120 km/h 行车时间占比(R _{d1}) 高于120 km/h 行车时间占比(R _{d2}) 交通违法次数(N _i) 制动踏板压力(S _b) 发动机转速(R) 转向盘角度(A _w) 制动时间百分比(R _b) 制动踏板位置(P _b) 油门踏板位置(P _p) 发动机负载(L _r)	N _f 、N _o 、N _c 、N _t 、P _p 、V、A、P _b 、P _p 、A _w 、R _b	混合式(组合、集成)分类方法	[33]~[38]	(1)安全、警告、轻度危险、危险 (2)危险型、隐患型和安全型 (3)激进熟练型、适中熟练型、保守熟练型、激进生疏型、适中生疏型、保守生疏型 (4)分心驾驶和非分心驾驶

基于统计特征的分类方法主要以车辆速度、加速度和Jerk作为分类指标,其分类结果通常较为简单,不够精细。基于机器学习的分类方法通常选取较多的驾驶行为特征参数对驾驶行为进行分类,其分类结果较为精
汽 车 技 术

细,在许多应用场景中能得到较好的分类效果。而混合式(组合、集成)的分类方法可以融合多种方法的优势,即使不采用较多的驾驶行为特征参数,其分类结果也较为精细,并且在特定场景中具有很高的分类精度,将是未来的研究重点。上述三种分类方法都是基于数据驱动的,数据之间的时序耦合关系考虑较少,考虑时空演化特征的驾驶行为分类及趋势演化机理研究是本领域研究者需要关注的内容。

4 驾驶行为量化评估

驾驶行为评价是对驾驶员在交通安全、能源消耗等方面的综合评估。驾驶行为评价结果能够为改善驾驶员操作习惯、提高行车安全提供合理可行的建议,因此对驾驶员的驾驶行为进行科学评价具有重要意义。本节依据驾驶行为评价的目的,从安全性、经济性以及其他维度对驾驶行为评估进行介绍。

4.1 安全性评价

由于影响驾驶行为的因素众多而复杂,不能从单一指标来评价其安全性。因此多数情况下,对驾驶行为进行全面的安全性评价往往需要涉及多个层次、多个方面的指标,这就需要采用综合评价法,从而得出更加科学合理的结论。在实际中应用较为广泛的是常规综合评价法,杨光^[39]提出了影响驾驶员驾驶行为的6个安全评价指标,每个指标对应不同的识别算法与评价方法,然后使用集成赋权法计算驾驶行为影响因子的权重,构建了驾驶行为评分模型,驾驶员得分计算的一般公式为:

$$S = w_1 k_1 + w_2 k_2 + w_3 k_3 + \dots + w_n k_n \quad (1)$$

式中: $k_i(1 \leq i \leq n)$ 为不同评价指标对应的量化分值; $w_i(1 \leq i \leq n)$ 为与之对应的各项指标权重,最终评分以百分制展示。

陈辉^[28]增加了平均车速、行驶时长、行驶里程、最大连续驾驶时长、疲劳驾驶次数等作为安全评价指标,采用组合赋权法计算各项指标权重,并以此建立驾驶行为评分模型,实现了驾驶行为的评价。结果显示,稳健型驾驶员得分基本分布在85~100分之间,一般型驾驶员得分基本分布在65~85分之间,而激进类型驾驶员得分基本分布在65分以下。

有的学者聚焦于攻击性驾驶行为^[40],基于层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)从4个方面分析了攻击性驾驶行为的因素,构建了攻击性驾驶行为的因素层次分析模型。通过专家调查问卷法计算评价指标权重,并转化为攻击性调查量表,按照百分制分数将攻击性驾驶行为划分为5个等级,分别对应5个安全等级评

价驾驶行为。上述几种评价模型均可以保证评价指标的公平性,但受权重系数影响较大。

除此之外,一些学者^[41-42]基于模糊综合评判,即基于模糊数学,将一些模糊的、难以量化的指标定量化,以此进行综合评价。许治琦等人^[41]基于AHP的模糊综合评价法,从构造因素集、评语集、权向量、隶属度矩阵、模糊综合评价结果矩阵五个环节对驾驶行为安全性进行量化分析。邓忠^[42]以速度、角速度、滚动角作为因素集,分别建立相应的隶属度函数,设置权重矩阵,通过计算隶属度作为安全驾驶评价指标。研究发现,正常驾驶的安全驾驶隶属度高于激烈驾驶的安全驾驶隶属度。上述研究的评价结果是以模糊集合或者模糊隶属度表示,这种评估方法适合从整体上对驾驶员的驾驶行为状态进行综合评估。

驾驶行为与事故倾向之间的关系已经被证明并广泛使用,探索影响驾驶风险的有效因子,可以量化评估个人驾驶行为的安全性并将其作为事故风险的评价指标^[43],实现对驾驶风险的有效预测。Wang等人^[44]提出了一种新的方法来量化碰撞事件中的驾驶风险,采用K-means方法将驾驶风险分为高、中、低三个级别,并基于CART方法分析了驾驶风险相关因素,实现了驾驶员风险评估。Xie等人^[45]基于动态贝叶斯网络和分布式遗传算法建立驾驶行为意识模型来估计不同交通场景下的车辆行为,并将其应用于车辆变道场景中驾驶行为的估计。Zhu等^[46]提出了一个融合回归模型和信息聚合机制的贝叶斯网络模型,研究了GPS驾驶观测结果、个体驾驶行为、个体驾驶风险和个体碰撞频率之间的关系,实现了对驾驶行为的评价。许多研究者通过对驾驶行为进行分析,以分类特征作为安全性评价指标,以事故或危险驾驶行为发生的次数划分风险等级,实现驾驶员行为的风险评估。经试验对比分析,将驾驶行为分类模型或分类结果运用于事故风险评估,其准确度优于驾驶行为评估模型,可以达到较好的预测效果。

除了基于模型方法评价驾驶行为,还有学者通过驾驶行为谱对驾驶行为安全性进行评估:陈镜任等^[37]基于驾驶人行为谱各项指标的分析,构建了驾驶行为谱体系结构,并采用模型视图控制器(Model View Controller, MVC)架构研发了驾驶人行为谱分析工具,为营运客车的驾驶人驾驶行为的定量分析提供了更为精确、有效的方案;陆键等人^[47]以车辆行驶轨迹数据为研究对象,针对不良驾驶行为,采用风险度量公式和四分位差法计算不良驾驶行为特征参数及其阈值,通过计算各个特征参数超出阈值的比例,得到不良驾驶行为谱特征

值,该方法能够综合评价车辆在各种不良驾驶行为的量化表现。

综上,从安全性角度对驾驶行为进行评估的方法主要有基于评估模型和基于驾驶行为谱两大类。前者将不同的影响因素及对应的不同权重构建成一个数学模型,以某种度量来展示驾驶行为的安全性;后者对驾驶行为特征参数进行数据处理,用图谱表示不同驾驶员对应的驾驶模式,并通过计算将不同驾驶模式对应的安全类别以数值形式表示在图谱中,可以直观地评估驾驶员驾驶行为的安全性。这两种评估方法都可以较好地展示出驾驶员驾驶行为的安全性能,对指导安全驾驶有重要作用。

4.2 经济性评价

在人-车-路系统中任何一个要素都会对驾驶行为构成影响,并将间接地影响到车辆的燃料消耗和污染物排放,影响着车辆经济性和环境保护。国内外许多学者在此领域进行了广泛的研究。

驾驶员不同的驾驶操作、不同的驾驶风格在很大程度上决定着驾驶经济性,文献[48]~文献[50]揭示了不同驾驶行为对油耗的影响关系。孟兴凯等^[48]采用发动机台架试验和道路试验相结合的方法,对汽车起步、换挡时机的选择、加速、减速、车速控制等典型的驾驶操作行为展开研究,分析了不同驾驶操作行为对汽车油耗的影响。Yi等^[19]探究了燃油里程和驾驶风格之间的相关性,并通过计算驾驶行为的燃油里程,分析了不同类型驾驶行为的燃油经济性。在此基础上,许多研究者基于车辆行驶特征参数进行驾驶行为经济性综合评估。徐歆钰^[49]基于速度、加速度、减速度、转速等建立各项评价指标的油耗模型,通过计算各项指标在单位时间内多消耗的油耗值之和作为驾驶行为经济性综合评分。Chen等人^[50]研究了驾驶员行为对燃料消耗的定量影响,提出了一种基于驾驶事件的生态驾驶行为评价模型。首先,基于出租车运行数据,分析了速度、加速度和驾驶模式持续时间与油耗之间的关系,确定了9个涉及油耗的驾驶事件(包括急剧加速、急剧减速和长期加速),然后,以一定距离内各驾驶事件的频率为自变量、车辆油耗为因变量,采用主成分分析和多元线性回归,建立驾驶员生态驾驶行为评价模型。该模型具有较高的精度(96.72%),进一步促进了定量生态驾驶建议的提出。陈晨^[51]以北京市出租车运行数据为基础,从微观层面对基于驾驶行为的城市道路车辆油耗特征进行了分析。基于运行速度、加速度及工况持续时间等参数构建了6种与油耗相关的驾驶事件的生态驾驶行为评估模

型。Ivanco等人^[52]通过傅里叶变换的方法,分析了速度、加速度、Jerk等信号的频域信息,定义波动激进性(Ripple Aggressive, RA)为Jerk信号傅里叶变换高频分量占总量的比例,将其作为燃油经济性的评价指标,并基于LA92和US06两种道路行驶工况数据进行加噪和平滑试验,模拟出不同波动激进程度的行驶数据,如图5所示。研究发现,当RA大于0.8时,驾驶行为更耗油,当RA小于0.8时更省油。Zhang等^[53]基于Jerk将驾驶行为分为九类,并分析了不同Jerk类型的驾驶行为的燃油经济性,进而建立了一种结合速度、加速度和Jerk的油耗模型,该模型在油耗预测方面具有较高的性能,可用于引导驾驶员节能驾驶。鲍宇^[54]利用MATLAB中的Simulink模型库,采用不同的评分算法建立了7种车辆工况相应的评价模型,并将模型输出值换算成百分数作为评价结果。分值越高,表明该驾驶行为降低油耗越有益。此外,一定行驶速度情况下,节气门开度处在合理水平,既能保障车辆行驶所需能源供给,又能减少不必要的能源消耗。

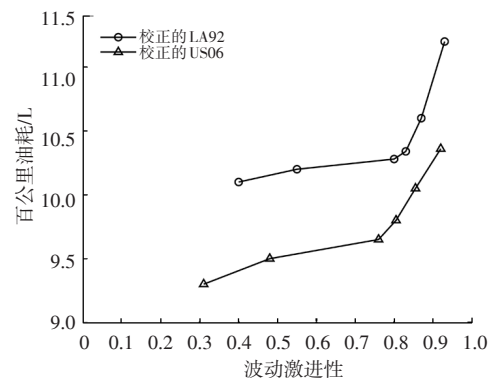


图5 波动激进性与油耗之间的关系^[52]

驾驶行为的经济性评价指标多以油耗作为评价指标,较少考虑到排放指标。对此,肖雄^[55]量化了驾驶行为与排放之间的联系,从排放角度出发,选取CO₂、NO_x和HC排放因子作为排放指标,利用因子分析法确定了影响污染物排放量的主因子作为评价指标,通过计算综合评价得分 F 作为生态驾驶评价指标,研究发现,因子综合得分 F 与排放量为正相关。

综上,从能耗和排放两个角度,对不同驾驶行为的经济性进行评价:能耗多以车辆速度、加速度、Jerk等车辆参数为指标,构建油耗模型对车辆燃油进行定量评估;排放多以排放因子为指标,构建综合评价函数对生态驾驶进行评价。

4.3 其他方面评价

除考虑安全性、经济性外,翟海朋^[56]对驾驶行为的适宜性,即特定的个人是否适合驾驶职业进行了检测评

价,首先根据驾驶行为特性分析,将驾驶行为划分为感知、判断、操作三类,并基于驾驶人职业适宜性理论选取了14项驾驶适宜性单项检测评价指标,接着通过探究各类驾驶行为与各项指标之间相关程度,完成了驾驶员适宜性检测,为驾驶员驾驶行为的培训与再教育提供了更有效的依据。Liu等人^[57]基于从自然驾驶研究中提取的人类驾驶员行为特征,分析速度、加速度动态参数分布概率,选择第5百分位和第95百分位回归线为安全性评估基线,选择第99百分位回归线为类人性评估基线,以此作为评价方法,对自适应巡航控制(Adaptive Cruise Control, ACC)系统进行了测试和评估。

更有学者从多个角度对驾驶行为进行综合性评价,王晓慧等^[58]从多目标(安全、油耗、维护、舒适)多维度出发,基于车联网数据分析每个维度的相关因素,根据各维度特征分别采用基于广义加性模型(Generalized Additive Model, GAM)和基于专家打分的方法建立评价模型,并构建了多维驾驶行为评价体系,实现了更全面、合理的驾驶行为评价。余剑方^[59]从操作规范、行车安全、车辆健康、经济节能、驾驶经验5个维度对驾驶行为进行综合评价,通过分析典型场景下的驾驶特征,选取14类特征作为驾驶行为评价指标,结合可拓层次分析法、熵权法、组合赋权法确定各指标的权重,并通过灰色白化权函数聚类法以及模糊综合评判法构建了驾驶行为综合评价模型,完成了驾驶员驾驶行为的量化评估。从多维度多方面对驾驶行为进行综合评价是未来的研究方向,有助于更加全面地评估驾驶行为,进一步提高安全、经济、舒适等方面的性能。

由于实际行车过程中场景复杂多变,影响驾驶行为的因素众多,对驾驶行为进行全面、系统评估有较大挑战。因此,以人、车、路、环境等因素为基础,以安全、经济、舒适、通行效率等为目标,构建多维度驾驶行为评估模型,制定统一的驾驶行为分级评价标准将成为该领域的一大热点和难点。

5 驾驶行为分类方法及量化评估应用现状

驾驶员培训是驾驶行为量化评估最直接的一种应用^[60],它以不同的方式对驾驶人提供动态、静态的驾驶建议,使其改善自身驾驶行为,提高驾驶技能,从而养成良好的驾驶习惯,达到安全驾驶、节能减排的目的。Toledo等人^[61]基于车载数据记录仪收集不同驾驶员的行驶数据,通过给予驾驶员不同的反馈意见,比较一段时间内的安全事件及燃料消耗量,研究表明良好的反馈可以使安全事件减少8%,燃料消耗量

减少3%~10%,对于驾驶风格激进的驾驶员效果更为显著。陈晨^[51]采用“闭环反馈”的模式设计搭建了面向驾驶员的生态驾驶行为监测、评估及矫正平台,如图6所示。该平台通过车载终端收集用户数据,以移动终端APP为媒介向用户发布评估结果及推送矫正意见,使用户了解其生态驾驶行为状况,针对性地提升驾驶技术,养成良好的驾驶习惯。伍毅平等^[62]基于如图7所示的驾驶模拟器平台,通过试验对比分析了生态驾驶行为培训前、后的车辆燃油消耗量,显示出驾驶行为培训促进节能减排的巨大潜力。

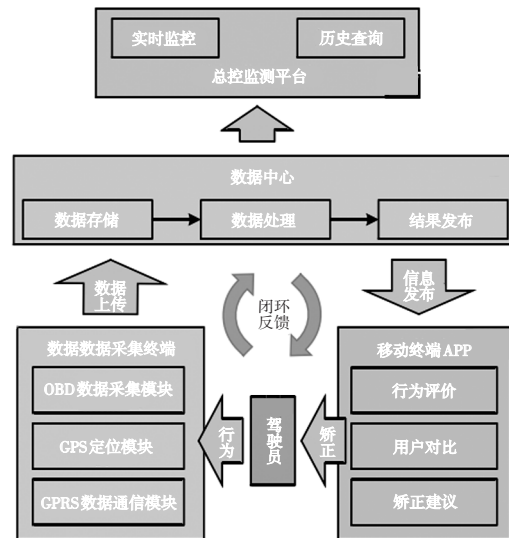


图6 生态驾驶监测平台功能构架^[51]

驾驶辅助系统利用多种传感器感知周围环境,可以帮助驾驶员监测和处理稳定性、控制和导航3个层面的信息,这将有效减少驾驶员的工作负担,同时提高驾驶的安全性和舒适性,除此以外,在行车过程中,还可以根据当前交通状况,为驾驶员提供更加经济的驾驶方案。Dai等^[63]提出了一个针对酒后驾驶的检测系统,利用手机程序从传感器收集数据,将检测到的行为与典型醉酒驾驶模式进行比较,对醉酒驾驶行为进行危险预警。该系统在智能手机(Android G1)上对不同的驾驶行为进行测试,得到了较高的检测精度。Jamson等人^[64]提出一种车载生态驾驶辅助系统,在反馈当前车辆燃油经济性的同时通过视觉、听觉、触觉模式实时地为驾驶员提供最省油的油门踏板开度,以指导驾驶员实现最佳燃油效率。另外,Wu等人^[65]的研究还显示了智能手机APP对降低油耗的具体效果,平均降低4.5%,最高降低13%。上述文献均是通过智能手机或车载平台以视、听等方式对驾驶员进行实时提醒,对于减少行车过程中的事故发生,以及节能减排都有明显作用,但由于交通环境复杂,驾驶过程中受到的影响因素众多,驾驶辅助系统的研究

仍有很大的发展空间。



图7 驾驶模拟器平台^[62]

随着大数据等智能技术应用于驾驶行为数据的采集,与之相关的UBI车险也得到了新的发展,Myers等人^[60]证明了车辆行驶环境及驾驶人行为是影响汽车风险状况的关键因子,PROGRESSIVE公司^[67]通过分析 50×10^8 km的驾驶行为数据,认为在预测保险理赔时,驾驶行为比其他因子更优。Paefgen等人^[68]通过对从保险公司获得的1600辆车车辆位置轨迹数据进行建模,探究了各种驾驶情况对事故参与风险的贡献。Tselentis等人^[69]基于按车付费和按驾驶付费分析了驾驶碰撞风险。近几年UBI研究者开始把研究重心放在基于驾驶行为UBI与数据挖掘领域的结合上,通过数据挖掘算法建立驾驶行为与事故风险之间的联系。依据驾驶行为分类模型构建车险模型,不同驾驶风险等级的用户具有不同的车险费率系数,体现了不同驾驶行为车险保费的差异,以激励用户改善驾驶行为,降低交通事故率。上述研究表明,UBI是一种较为前沿的方法,对交通安全、交通拥堵和污染排放等有重大的潜在影响。

6 结束语

本文回顾了近年来驾驶行为研究领域驾驶行为分类及量化的研究成果。首先将驾驶行为分类方法分为基于统计特性的分类方法、基于机器学习的分类方法和混合式(组合、集成)分类方法三大类,对不同的驾驶行为分类方法的代表算法、优点及局限性等进行了系统归纳。其次,从安全性、经济性、舒适性等多个维度对驾驶行为的量化评估研究进行了系统介绍。

驾驶行为研究是综合了心理学、生理学、物联网技术、数据挖掘、交通等领域知识的交叉学科研究,其发展也受到各方面技术水平发展的促进与制约。由于驾驶行为对车辆行车安全性、环保经济性、乘坐舒适性等方面有着重要影响,未来,驾驶行为分类及量化评估方面的研究将持续受到关注。

从驾驶行为分类方法角度,未来研究的趋势将更加倾向于通过机器学习方法与混合式方法进行驾驶行为分类。目前,基于统计特性的分类方法在驾驶行为分类

研究中应用甚广,但是该分类方法能力有限,而基于机器学习方法的驾驶行为分类在特定应用场景内优于基于统计特征的分类方法。且基于机器学习方法进行驾驶行为分类,对大数据集分类比较友好。随着机器学习技术的不断发展,其强大的自学习与非线性拟合能力将能够更好地建立回归模型,提高分类精度。此外,混合式(组合、集成)分类方法基于特定的应用场景,可以取长补短,集成几种方法的优点,具有高分类精度的潜力,也将是未来的研究趋势。

从驾驶行为量化评估应用角度,未来驾驶行为将逐步趋向于面向行业应用的精细化分类研究,驾驶行为精细化分类对驾驶行为相关研究的深入进行很有帮助。在不同的应用场景下,选择适用的方法,可以在该场景下达到理想的分类结果。如在节能环保方面,通过改善驾驶员的不良驾驶行为,可以降低车辆能耗,延长车辆与道路的使用寿命。在保险相关行业,依据驾驶风格进行差异化定价是未来发展的趋势。在交通法规方面,对于由不良驾驶行为导致交通事故的驾驶员,可给予更加严厉的惩罚。

从驾驶行为研究对象角度,随着智能网联技术的不断发展,道路行驶车辆的智能化程度及网联化程度将不断提升,未来对智能网联车辆的驾驶行为研究将更侧重于决策、轨迹规划与跟踪控制方面的研究,以及从安全性、经济性、舒适性、通行效率等方面,对智能网联车辆驾驶行为的评估研究。

在驾驶行为研究纵深度方面,当前对驾驶行为的研究更加侧重于以离散化的数据驱动为基础,而较少开展基于“人-车-路-环境”等综合因素下驾驶行为的成因机理及其时空演化规律的研究,缺乏对驾驶行为形成机理及时空演化过程的深入挖掘,该科学问题仍有待进一步研究和探索。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国公安部交通管理局. 全国机动车保有量达4.35亿辆 驾驶人达5.23亿人 新能源汽车保有量超过2000万辆[EB/OL]. 北京: 中华人民共和国中央人民政府. (2024-01-11) [2024-05-07]. <https://www.mps.gov.cn/n2254314/n6409334/c9384907/content.html>.
Traffic Management Bureau of the Ministry of Public Security of the People's Republic of China. The Total Number of Motor Vehicles in China Has Reached 435 Million, with 523 Million Drivers and Over 20 Million New Energy Vehicles [EB/OL]. Beijing: The State Council The People's Republic of China. (2024-01-11)[2024-05-07]. <https://www.mps.gov.cn/n2254314/n6409334/c9384907/content.html>.

- [2] 国家统计局. 中华人民共和国2023年国民经济和社会发展统计公报[N]. 人民日报, 2024-03-01(10).
National Bureau of Statistics of China. Statistical Communiqué of the People's Republic of China on the 2023 National Economic and Social Development[N]. People's Daily, 2024-03-01(10).
- [3] 中华人民共和国生态环境部. 中国移动源环境管理年报(2023年)[J]. 环境保护, 2024, 52(2): 48-62.
Ministry of Ecology and Environment the People's Republic of China. China Mobile Source Environmental Management Annual Report in 2023[J]. Environmental Protection, 2024, 52(2): 48-62.
- [4] 廖纪勇. 基于聚类和关联规则的驾驶行为分析与研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
LIAO J Y. Analysis and Research of Driving Behavior Based on Clustering and Association Rules[D]. Kunming: Kunming University of Technology, 2021.
- [5] 李世武, 蒋彬, 初秀民, 等. 驾驶行为对车辆燃料消耗和污染物排放的影响研究综述[J]. 公路交通科技, 2003(1): 155-158.
LI S W, JIANG B, CHU X M, et al. A Review of Driving Behavior Influence on Fuel Consumption and Exhaust Emission of Vehicle[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003(1): 155-158.
- [6] 冀秉魁. 基于驾驶员视觉特性的驾驶行为预测方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
JI B K. Research on Driving Behavior Prediction Method Based on Driver's Visual Characteristics[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [7] 李士深. 基于隐马尔可夫模型的驾驶员行为分析研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
LI S S. Research on Driver Behavior Analysis Based on Hidden Markov Model[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.
- [8] SILVA I, EUGENIO N J. A Systematic Methodology to Evaluate Prediction Models for Driving Style Classification[J]. Sensors, 2020, 20(6): 1692.
- [9] 杨硕, 杜煜, 杜晨, 等. 驾驶行为研究方法综述[C]// 中国计算机用户协会网络应用分会. 中国计算机用户协会网络应用分会2017年第二十一届网络新技术与应用年会论文集. 雄安: 《计算机科学》编辑部, 2017: 127-130.
YANG S, DU Y, DU C, et al. A Review of Research Methods on Driving Behavior[C]// Network Application Branch of China Computer Users Association. Proceedings of the 21st Annual Conference on New Network Technologies and Applications in 2017 by the Network Application Branch of China Computer Users Association. Xiong'an: Editorial Board of Computer Science, 2017: 127-130.
- [10] 严新平, 张晖, 吴超仲, 等. 道路交通驾驶行为研究进展及其展望[J]. 交通信息与安全, 2013, 31(1): 45-51.
YAN X P, ZHANG H, WU C Z, et al. Research Progress and Prospect of Road Traffic Driving Behavior[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2013, 31(1): 45-51.
- [11] MILES D E, JOHNSON G L. Aggressive Driving Behaviors: Are there Psychological and Attitudinal Predictors?[J]. Transportation Research Part F: Psychology and Behaviour, 2003, 6(2): 47-161.
- [12] PALETI R, ELURU N, BHAT C R. Examining the Influence of Aggressive Driving Behavior on Driver Injury Severity in Traffic Crashes[J]. Accident Analysis and Prevention, 2010, 42(6): 1839-1854.
- [13] EBOLI L, MAZZULLA G, PUNGILLO G. Combining Speed and Acceleration to Define Car Users' Safe or Unsafe Driving Behaviour[J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2016, 68: 113-125.
- [14] LANGARI R, WON J S. Intelligent Energy Management Agent for A Parallel Hybrid Vehicle - Part I: System Architecture and Design of the Driving Situation Identification Process[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(3): 925-934.
- [15] WON J S, LANGARI R. Intelligent Energy Management Agent for A Parallel Hybrid Vehicle - Part II: Torque Distribution, Charge Sustainance Strategies, and Performance Results[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(3): 935-953.
- [16] VLIGER I D, KEUKELEERE D D, KRETZSCHMAR J G. Environmental Effects of Driving Behaviour and Congestion Related to Passenger Cars[J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(27): 4649-4655.
- [17] HYUNMYUNG K, JUN S O, JAYAKRISHNAN R. Application of Activity Chaining Model Incorporating A Time Use Problem to Network Demand Analysis[J]. Transportation Research Record, 2006, 1977(1): 214-224.
- [18] EVNGCHEOL K, CHOI E. Estimates of Critical Values of Aggressive Acceleration from A Viewpoint of Fuel Consumption and Emissions[C]// Transportation Research Board. Transportation Research Board Meeting. Washington DC: Transportation Research Board, 2013.
- [19] YI L M, MILTON R, KILIARIS L. Driver's Style Classification Using Jerk Analysis[C]// 2009 IEEE Workshop on Computational Intelligence in Vehicles and Vehicular Systems. New York: 2009: 23-28.
- [20] WANG X, KHATTAK A J, LIU J, et al. What is the Level of Volatility in Instantaneous Driving Decisions?[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 58: 413-427.
- [21] MOHSEN K, RAMIN A, KHATTAK A J. Extracting Useful

- Information from Basic Safety Message Data: An Empirical Study of Driving Volatility Measures and Crash Frequency at Intersections[J]. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2018, 2762(38): 290–301.
- [22] 高岩. 基于驾驶行为分类的UBI费率厘定模型[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
GAO Y. UBI Rating Model Based on Driving Behavior Classification[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [23] 杨鸿飞. 基于驾驶行为分类的UBI车险费率厘算模型及发展对策研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
YANG H F. Research on the Calculation Model and Development Strategy of UBI Vehicle Insurance Rate Based on Driving Behavior Classification[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021.
- [24] BROMBACHER P, MASINO J, FREY M, et al. Driving Event Detection and Driving Style Classification Using Artificial Neural Networks[C]// 2017 IEEE International Conference on Industrial Technology. New York: IEEE, 2017: 997–1002.
- [25] LATTANZI E, FRESCHI V. Machine Learning Techniques to Identify Unsafe Driving Behavior by Means of In-Vehicle Sensor Data[J]. *Expert Systems with Applications*, 2021, 176.
- [26] NIU Y, LI Z M, FAN Y X. Analysis of Truck Drivers' Unsafe Driving Behaviors Using Four Machine Learning Methods[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2021, 86.
- [27] YUKSEL A S, ATMACA S. Driver's Black Box: A System for Driver Risk Assessment Using Machine Learning and Fuzzy Logic[J]. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2021, 25(5): 482–500.
- [28] 陈辉. 面向车联网大数据的驾驶行为分析[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.
CHEN H. Driving Behavior Analysis for Car Networking Big Data[D]. Guiyang: Guizhou University, 2020.
- [29] 牛增良, 李海斌, 王文峰, 等. 基于聚类分析的营运驾驶人危险驾驶行为研究[J]. *山东交通学院学报*, 2014, 22(1): 19–23.
NIU Z L, LI H B, WANG W F, et al. Study on Risky Behavior of Commercial Drivers Based on Cluster Analysis [J]. *Journal of Shandong Jiaotong University*, 2014, 22(1): 19–23.
- [30] 孙川, 吴超仲, 褚端峰, 等. 基于车联网数据挖掘的营运车辆驾驶速度行为聚类研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2015, 15(6): 82–87.
SUN C, WU C Z, CHU D F, et al. Driving Speed Behavior Clustering for Commercial Vehicle Based on Connected Vehicle Data Mining[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2015, 15(6): 82–87.
- [31] 张磊, 王建强, 杨馥瑞, 等. 驾驶员行为模式的因子分析和模糊聚类[J]. *交通运输工程学报*, 2009, 9(5): 121–126.
ZHANG L, WANG J Q, YANG F R, et al. Factor Analysis and Fuzzy Clustering of Driver Behavior Patterns[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2009, 9(5): 121–126.
- [32] 孟妮, 韩丹. 聚类分析和模糊逻辑在驾驶行为辨识中的应用[J]. *计算机与数字工程*, 2013, 41(7): 4.
MENG N, HAN D. Application of Cluster Analysis and Fuzzy Logic in Driving Behavior Identification[J]. *Computer and Digital Engineering*, 2013, 41(7): 4.
- [33] 郑恒杰, 熊昕, 张上. 基于车联网数据挖掘的驾驶员行为分析[J]. *信息通信*, 2019(8): 52–55.
ZHENG H J, XIONG X, ZHANG S. Driver Behavior Analysis Based on Vehicle Network Data Mining[J]. *Information & Communications*, 2019(8): 52–55.
- [34] 张雅楠. 基于行车数据的危险驾驶行为研究[D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2020.
ZHANG Y N. Study on Dangerous Driving Behavior Based on Driving Data[D]. Jinzhou: Liaoning University of Technology, 2020.
- [35] ERSAL T, FULLER H, TSIMHONI O, et al. Model-Based Analysis and Classification of Driver Distraction under Secondary Tasks[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2010, 11(3): 692–701.
- [36] EREN H, MAKINIST S, AKIN E, et al. Estimating Driving Behavior by A Smartphone[C]// 2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. New York: IEEE, 2012: 234–239.
- [37] 陈镜任, 吴业福, 吴冰. 基于车辆行驶数据的驾驶人行为谱分析方法[J]. *计算机应用*, 2018, 38(7): 1916–1922+1928.
CHEN J R, WU Y F, WU B. Driver Behavior Spectrum Analysis Method Based on Vehicle Driving Data[J]. *Journal of Computer Applications*, 2018, 38(7): 1916–1922+1928.
- [38] 孙剑, 张一豪, 王俊骅. 基于自然驾驶数据的分心驾驶行为识别方法[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(9): 225–235.
SUN J, ZHANG Y H, WANG J H. Detecting Distraction Behavior of Drivers Using Naturalistic Driving Data[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(9): 225–235.
- [39] 杨光. 基于车辆行驶数据的驾驶员行为模型构建与应用[D]. 西安: 西安石油大学, 2021.
YANG G. Construction and Application of Driver Behavior Model Based on Vehicle Driving Data[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2021.
- [40] 李山虎. 攻击性驾驶行为评价方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.

- 学, 2011.
- LI S H. The Research on Evaluation Method of Aggressive Driving[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [41] 许治琦, 姚远, 周兴社, 等. 基于模糊综合评价的驾驶安全性评价研究[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(7): 261-265.
- XU Z Q, YAO Y, ZHOU X S, et al. Research on Driving Safety Evaluation Technology Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation[J]. Computer Measurement and Control, 2019, 27(7): 261-265.
- [42] 邓忠. 基于车载自组织网的车辆状态识别与驾驶行为评估[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- DENG Z. Vehicle State Recognition and Driving Behavior Assessment Based on VANET[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [43] 楚文慧, 吴超仲, 张晖. 驾驶行为安全性评价研究综述[J]. 公路交通科技, 2017(增刊2): 9.
- CHU W H, WU C Z, ZHANG H. A Review of Safety Evaluation of Driving Behaviors[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017(S2): 9.
- [44] WANG J Q, ZHENG Y, LI X F, et al. Driving Risk Assessment Using Near-Crash Database Through Data Mining of Tree-Based Model[J]. Accident Analysis and Prevention, 2015, 84: 54-64.
- [45] XIE G T, GAO H B, HUANG B, et al. A Driving Behavior Awareness Model Based on A Dynamic Bayesian Network and Distributed Genetic Algorithm[J]. International Journal of Computational Intelligence Systems, 2018, 11(1): 469.
- [46] ZHU X Y, YUAN Y F, HU X B, et al. A Bayesian Network Model for Contextual Versus Non-Contextual Driving Behavior Assessment[J]. Transportation Research Part C, 2017, 81: 172-187.
- [47] 陆键, 王可, 蒋思明. 基于车辆行驶轨迹的道路不良驾驶行为实时辨识方法[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(6): 227-235.
- LU J, WANG K, JIANG Y M. Real-time Identification Method of Abnormal Road Driving Behavior Based on Vehicle Driving Trajectory[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(6): 227-235.
- [48] 孟兴凯, 曾诚, 阳冬波, 等. 不同驾驶操作行为对车辆燃油消耗量的影响分析[J]. 交通节能与环保, 2012, 8(4): 14-20.
- MENG X K, ZENG C, YANG D B, et al. Analysis of the Vehicle Fuel Consumption for Different Driving Operation Behavior[J]. Energy Conservation & Environmental Protection in Transportation, 2012, 8(4): 14-20.
- [49] 徐歆钰. 营运车辆驾驶员驾驶行为经济性评价及性能提升研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- XU X Y. Research on Operating Vehicle Drivers' Driving Behavior Economy Evaluation and Performance Improvement[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [50] CHEN C, ZHAO X H, YAO Y, et al. Driver's Eco-Driving Behavior Evaluation Modeling Based on Driving Events[J]. Journal of Advanced Transportation, 2018, 2018: 1-12.
- [51] 陈晨. 城市道路驾驶员生态驾驶行为评估方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
- CHEN C. Research on Evaluation Method of Driver's Eco-Driving Behavior on Urban Road[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016.
- [52] LIU Z F, IVANCO A, FILIPI Z. Quantification of Drive Cycle's Rapid Speed Fluctuations Using Fourier Analysis [J]. SAE International Journal of Alternative Powertrains, 2015, 4(1): 170-7.
- [53] ZHANG L C, PENG K, ZHAO X M, et al. New Fuel Consumption Model Considering Vehicular Speed, Acceleration, and Jerk[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2023, 27(2): 174-186.
- [54] 鲍宇. 基于驾驶行为的绿色驾驶算法模型的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2015.
- BAO Y. The Research on Eco-Driving Algorithm Model Based on Driving Behavior[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015.
- [55] 肖雄. 基于车辆排放测试及跟驰模型的生态驾驶行为评价研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- XIAO X. Evaluation of Eco-Driving Behavior Based on Vehicle Emission Test and Car-Following Model[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [56] 翟海朋. 营运车辆驾驶员驾驶行为与驾驶适宜性检测单项指标相关性研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- ZHAI H P. Study on Relationship Between the Driving Behaviors and the Single Index of the Driving Suitability Tests to Professional Drivers[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [57] LIU L, ZHANG Q, LIU R, et al. Adaptive Cruise Control System Evaluation According to Human Driving Behavior Characteristics[J]. Actuators, 2021, 10(5): 90.
- [58] 王晓慧, 荣见华, 杨向前. 基于车联网的多维驾驶员行为评价方法研究[J]. 机电工程技术, 2020, 49(11): 119-122.
- WANG X H, RONG J H, YANG X Q. Research on Multidimensional Driver Behavior Evaluation Method Based on Internet of Vehicles[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2020, 49(11): 119-122.
- [59] 余剑方. 基于自然驾驶数据的驾驶行为研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- YU J F. Research on Driving Behavior Based on Natural Driving Data[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- [60] 付锐, 张雅丽, 袁伟. 生态驾驶研究现状及展望[J]. 中国

- 公路学报, 2019, 32(3):1-12.
- FU R, ZHANG Y L, YUAN W. Progress and Prospect in Eco-Driving[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(3): 1-12.
- [61] TOLEDO G, SHIFTAN Y. Can Feedback from In-Vehicle Data Recorders Improve Driver Behavior and Reduce Fuel Consumption?[J]. Transportation Research Part A, 2016, 94: 194-204.
- [62] 伍毅平, 赵晓华, 荣建, 等. 基于驾驶模拟实验的生态驾驶行为节能减排潜力[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(8): 1212-1218.
- WU Y P, ZHAO X H, RONG J, et al. Potential of Eco-Driving in Reducing Fuel Consumption and Emissions Based on a Driving Simulator[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41(8): 1212-1218.
- [63] DAI J P, TENG J, BAI X L, et al. Mobile Phone Based Drunk Driving Detection[C]// 2010 4th International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare. New York: IEEE, 2010: 1-8.
- [64] JAMSON A H, HIBBERD D L, MERAT N. Interface Design Considerations for An In-Vehicle Eco-Driving Assistance System[J]. Transportation Research Part C, 2015, 58: 642-656.
- [65] WU Y P, ZHAO X H, CHEN C, et al. Development and Application of an Eco-driving Support Platform Based on Internet + : Case Study in Beijing Taxicabs[J]. Transportation Research Record, 2017, 2645(1): 57-66.
- [66] BLANCHARD R A, MYERS A M, PORTER M M. Correspondence Between Self-Reported and Objective Measures of Driving Exposure and Patterns in Older Drivers[J]. Accident Analysis and Prevention, 2010, 42(2): 523-529.
- [67] PROGRESSIVE. Linking Driving Behavior to Automobile Accidents and Insurance Rates: An Analysis of Five Billion Miles Driven[R]. Washington D C, Progressive: 2012.
- [68] PAEFGEN J, STAAKE T, FLEISCH E. Multivariate Exposure Modeling of Accident Risk: Insights from Pay-as-You-Drive Insurance Data[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2014, 61: 27-40.
- [69] TSELENTIS D I, YANNIS G, VLAHOIANNI E I. Innovative Motor Insurance Schemes: A Review of Current Practices and Emerging Challenges[J]. Accident Analysis Prevention, 2017, 98: 139-148.

(责任编辑 王 一)

修改稿收到日期为2023年5月22日。