

自动驾驶汽车接管模式与事故 严重程度关联性分析

潘义勇, 杨赛赛

(南京林业大学汽车与交通工程学院, 南京 210037)

摘要:为探究自动驾驶汽车事故伤害严重程度影响因素,构建了考虑中介效应的结构方程模型,并对自动驾驶汽车接管模式与事故严重程度进行关联性影响因素分析。采用 AVOID 数据集中的自动驾驶汽车事故数据,从车辆特性、天气特性、道路特性和碰撞状况 4 个方面选取 17 个影响因素,利用中介效应和因子结构分析探究各因素对自动驾驶事故严重程度的影响。结果表明:交叉路口和街道可以显著降低自动驾驶汽车交通事故严重程度;路面状况、多云、雨、碰撞(左后方)和白天通过中介效应对事故严重程度产生间接影响,其中路面状况可以显著降低交通事故严重程度,天气(雨)明显增加了交通事故严重程度;自动驾驶汽车发生交通事故时的接管模式对事故严重程度具有显著负作用,且二者具有复杂的关联性。

关键词:交通运输系统工程;事故严重程度;结构方程模型;自动驾驶汽车;接管模式;中介效应
中图分类号:U491 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2026)08-2077-07

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20250060

Analysis of correlation between self-driving car takeover mode and accident severity

PAN Yi-yong, YANG Sai-sai

(College of Automotive and Transportation Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: In order to investigate the factors influencing the severity of injury in self-driving car accidents, a structural equation model considering mediating effects was constructed to analyze the correlation between the takeover mode of self-driving cars and the severity of accidents. Using the self-driving car accident data in AVOID dataset, 17 influencing factors were selected from four aspects: vehicle characteristics, weather characteristics, road characteristics and collision conditions, and the mediating effect and factor structure analysis were used to explore the influence of each factor on the severity of self-driving accidents. The results show that road type can significantly reduce the severity of self-driving car accidents. Road condition, weather-cloudy, weather-rain, collision-left rear and lighting-daylight indirectly affect the severity of self-driving car accidents through the mediating effect. Among them, road condition can significantly reduce the severity of traffic accidents. Weather-rain significantly increases the severity of traffic accidents of self-driving cars. The takeover mode of the self-driving car when it is involved in a

收稿日期: 2025-01-12.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508280).

作者简介: 潘义勇(1980-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 交通运输规划与管理. E-mail: uoupanyg@njfu.edu.cn

traffic accident has a significant negative effect on accident severity and the two have a complex correlation.

Key words: engineering of communications and transportation system; accident severity; structural equation modelling; self-driving cars; car takeover; mediating effects

0 引言

截止至 2023 年上半年,我国辅助自动驾驶汽车(Autonomous vehicle, AV)市场渗透率达 42.4%,新能源乘用车 L2 级及以上的辅助驾驶功能装车率已达 55.3%,由于技术和条件制约,人机共驾阶段将长期存在^[1,2]。随着自动驾驶汽车数量与日俱增,自动驾驶汽车事故频发,因此有必要对自动驾驶汽车发生事故时的接管模式与事故严重程度的关联度进行分析。

国内外针对交通事故严重程度的研究,大多采用传统的线性模型,围绕驾驶员特性、车辆性能、道路特征和自然环境这 4 个方面进行分析。Lym 等^[3]建立了广义有序 Logit 回归模型,研究了驾驶员分心驾驶时,不同道路环境特征下的事故严重程度特性。Islam 等^[4]基于随机参数 Logit 模型探讨了农村和城市地区行人过失碰撞造成事故严重程度的因素差异。潘义勇等^[5]采用均值和方差异质性的随机参数 Logit 模型探究了老年人事故严重程度的异质性,发现摩托车、直线、湿润等因素显著增加了事故伤害严重程度。Hou 等^[6]采用了均值混合 Logit 模型替代常用的多项 Logit 模型和混合 Logit 模型,特别考虑了由驾驶员特征引起的异质性在高速公路单车碰撞事故中对驾驶员受伤严重程度的影响。随着所探寻到的交通事故严重程度影响因素逐渐增加,国内外学者们在预测模型的选择上也愈加丰富。Chen 等^[7]应用层次贝叶斯逻辑模型研究了高速公路碰撞事故中车辆驾驶员水平的显著因素对驾驶员伤害严重程度的异质性影响。陈坚等^[8]运用梯度提升决策树(Gradient boosting decision tree, GBDT)模型探索了建成环境与交通事故严重程度之间的非线性关系。

随着事故严重程度的研究愈发深入,针对事故严重程度的关联性影响因素逐渐被发现。Khattak 等^[9]将辅助驾驶系统是否脱离和车辆发生碰撞相互关联并建立内生转换机模型,对二者的内在联系和影响因素进行探索性研究。赵丹

等^[10]构建双变量 Probit 模型对事故形态和事故严重程度之间的相关性和影响因素进行关联分析。刘强等^[11]提出一种基于事故综合强度+K-means 的公交事故严重程度分类方法,并建立模型探讨了高峰期、换道、超速和进出站等因素对公交事故严重程度的关联性影响。Jin 等^[12]以驾驶员接管时间和质量为内生变量建立结构方程模型,并考虑信任、系统特征、环境特征等因素对接管性能变化的中介作用进行探索。Sinha 等^[13]使用不同的机器学习技术对大量的自动驾驶系统脱离数据进行处理分析,以研究发生人工接管对碰撞严重程度产生的关联性影响。

综上所述,现有研究多集中运用不同预测模型来探究人、车、路、以及自然环境等因素对事故严重程度的影响,样本类型也多以传统驾驶车辆为主,较少考虑人机共驾阶段自动驾驶汽车接管模式对事故严重程度的关联性影响以及事故严重程度与相关变量之间存在的中介效应关系。本文通过对加利福尼亚州的 AVOID 自动驾驶汽车事故数据集进行筛选和统计性分析,从车辆特性、天气特性、道路特性和碰撞状况 4 个方面选取 17 个相关影响因素,利用结构方程模型的因子分析和结构分析功能,并通过中介效应分析来探究各因素对自动驾驶事故严重程度的影响及关联性。研究结果可为降低自动驾驶汽车事故严重程度提供理论依据。

1 研究方法

1.1 结构方程模型

结构方程模型(Structural equation model, SEM)又称因果模型,是近年来统计学的重要发展之一。它不仅具有传统统计模型的许多基本功能,还能对多个因变量之间的因果关系进行分析,同时考虑和处理多个因变量和估计因子结构关系,且容许自变量和因变量含有测量误差。主要由随机变量、结构参数和非随机变量组成,包括观测变量、势变量、误差变量和其他随机变量。根据观测变量构造势变量,变量之间的关系用结构参

数表示,非随机变量是不能包含的探索性变量。根据结构方程模型中对不同变量所描述关系的不同,可将其分为测量模型和结构模型。

1.1.1 测量模型

测量模型主要描述潜变量和观测变量之间的关系,测量方程表达式为:

$$\begin{cases} x = \lambda_x \eta + \delta \\ y = \lambda_y \epsilon + \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: η 为与内生潜变量; x 为与内生潜变量相关的观测变量; ϵ 为外生潜变量; y 为与外生潜变量 ϵ 相关的观测变量; θ 为观测潜变量 y 相关的误差项; δ 为观测变量 x 的误差项; λ_x 和 λ_y 分别为观测变量 x 、 y 与潜变量 η 、 ϵ 之间的关系,即观测变量对潜变量的因子载荷矩阵。

1.1.2 结构模型

结构模型通常用于描述潜变量与潜变量之间的关系,其回归方程式为:

$$\eta = \alpha \eta + \beta \epsilon + \phi \quad (2)$$

式中: α 、 β 均为结构方程的路径系数,分别表示内生潜变量之间的关系和外生潜变量 ϵ 对内生潜变量 η 之间的影响; ϕ 为残差项,表示结构方程中无法解释的部分。

1.2 中介效应

中介效应(Mediation)是指自变量 X 对因变量 Y 的影响部分或全部通过一个或多个中介变量 M 来实现的现象。中介效应分析是用于检验这种影响机制的一种统计方法。其主要目的是,确定自变量对因变量的影响是否通过中介变量传递,以及这种传递的强度和显著性。中介效应可以是部分中介或完全中介两种情况。基本表达式如下:

$$\begin{cases} M = aX + e_2, & \text{中介效应公式} \\ Y = c'X + bM + e_3, & \text{直接效应公式} \\ Y = cX + e_1, & \text{总效应公式} \end{cases} \quad (3)$$

式中: a 为自变量 X 对中介变量 M 的效应; b 为中介变量 M 对因变量 Y 的效应。

中介效应等于间接效应,即系数乘积 ab ; c' 为在控制中介变量 M 的影响后,自变量 X 对因变量 Y 的直接效应; c 为自变量 X 对因变量 Y 的总效应,即 X 对 Y 的直接影响,不考虑中介变量 M 的影响; e_1 、 e_2 、 e_3 均为误差项。

1.3 建模方法

研究了自动驾驶汽车发生交通事故时接管模式与事故严重程度之间的关联性及其影响因素。首先,选用事故严重程度和接管模式作为两个因变量,利用广义线性模型对所选取的17个自变量进行回归分析,并剔除结果中显著系数高于0.05的相关变量。其次,构建结构方程假设模型,以接管模式和事故严重程度分别作为两个形成型潜变量,将上一步筛选出的显著变量分别作为对应的观测变量建立测量模型。在结构模型中,假设潜变量关系为接管模式影响事故严重程度,以便于交通事故严重程度影响因素分析。然后,不断进行路径调整和模型拟合检验,得出最优模型并进行关于接管模式的中介效应分析。最后,通过结构方程模型结果数据和中介效应公式计算出各影响因素对自动驾驶汽车事故严重程度的总体影响载荷,并进行讨论分析。

2 数据描述

基于研究对象为配备高级驾驶辅助系统(Advanced driver assistance system, ADAS)和自动驾驶系统(Automated driving system, ADS)的车辆,数据选择来自美国国家公路交通安全管理局(NHTSA)、加利福尼亚州机动车管理局(CADMV)和全球事故新闻中所收集,并经人工验证汇总后的AVOID自动车事故数据集^[14]。根据年份、地点、车辆型号等因素对自动驾驶车辆发生事故数据进行处理后,共筛选出符合模型估计要求的数据392条。

因变量选取为发生事故时自动驾驶汽车接管模式和事故严重程度。392起事故中发生人工接管有112起,其余均为ADS/ADAS模式。ADS模式、ADAS模式和发生人工接管的占比分别为49.5%、21.9%和28.6%。美国高速公路管理局将交通事故严重程度分为5类:K(fatal injury)指事故发生后30天内人员死亡;A(incapacitant injury)指人员受伤,并且需要送往医院进行医疗救助;B(non-incapacitant injury)指人员受到非失能性伤害,如割伤、擦伤等;C(possible injury)指人员可能受伤,即人员无外伤但自述有疼痛的感觉或意识不清;O(no injury)指人员未受伤。将以上五类分为重伤事故(K、A、B)和非重伤事故(C、O)2个等级,事故数据比例为56:336。

自变量选取主要从车辆特性、天气特性、道路特性和碰撞状况等方面共选取 17 个影响因素。自变量分类描述如表 1 所示。

表 1 自变量描述表
Table 1 Categorical descriptive table

分类	自变量	自变量描述	频数
车辆特性	汽车品牌	本田	11
		通用	28
		福特	31
		本田	47
		捷豹	110
		斯巴鲁	21
		特斯拉	38
		丰田	24
		其他(宝马/奥迪/奔驰/现代/凯迪拉克/雷克萨斯)	82
	接管模式	ADS 模式	194
		ADAS 模式	86
		人工接管	112
	车型年份	2015~2016	28
		2017~2018	27
		2019~2020	119
		2021~2022	200
		其他(2023/未知)	8
	自动系统使用年份	少于 2 年	228
		2~5 年	122
		5 年以上	35
		其他(未知)	7
天气特性	雨	是	14
		否	377
	多云	是	27
		否	365
道路特性	道路类型	高速公路	93
		交叉路口	135
		街道	102
	路面状况	其他	62
		干燥	369
		湿润	23
	道路照明	白天	278
		黄昏和黎明	15
		夜晚	99
碰撞状况	碰撞区域(前方)	是	73
		否	319
	碰撞区域(左前方)	是	68
		否	324
	碰撞区域(右前方)	是	69
		否	323

续表			
分类	自变量	自变量描述	频数
	碰撞区域(后方)	是	98
		否	294
	碰撞区域(左后方)	是	80
		否	312
	碰撞区域(右后方)	是	89
		否	303
	碰撞区域(左方)	是	31
		否	361
	碰撞区域(右方)	是	25
		否	367

3 模型估计及检验

3.1 模型估计及结果

应用 R 软件对模型参数进行估计。根据软件所提供的模型参数和修正指数对模型进行路径调整更新以得出最优模型,最终拟合结果如表 2 所示。将本次模型的拟合指数与建议值进行对比,卡方 χ^2 为 18.941(自由度 d_f 为 7、 $P=0.008$);卡方与自由度比值大于 1 且小于 3;塔克-刘易斯指数 TLI 的值为 0.592;均方根残差 RMR 的值小于 0.05;拟合优度指数 AGFI 显著大于 0.9。由此得出,最终模型与样本数据能够适配且模型相对合适。

表 2 结构方程模型拟合指标
Table 2 Structural equation model fitting metrics

拟合指标	χ^2	χ^2/d_f	P 值	TLI	RMR	AGFI
参考值	>0.05	>1;<3	<0.05	>0.9	<0.05	>0.9
指标值	18.941	2.706	0.008	0.592	0.022	0.922

3.2 模型稳定性检验

采用适用于小样本量的 Bootstrap 检验方法,通过 500 次抽样计算偏差校正的加速置信区间(BCa)以评估结果的稳健性,并利用软件计算标准化路径系数的 95% BCa 置信区间。检验结果表明:所有显著路径的标准化系数置信区间均不包含零值;置信区间宽度适中(0.165~0.241),估计精度良好;所有显著效应的方向一致(正负号稳定);核心路径接管模式对事故严重程度的效应量合理;雨天对接管模式的影响接近零值且未发现显著性影响。检验结果表明,该研究结论具有良好稳定性。具体检验结果如表 3 所示。

表 3 Bootstrap 抽样检验结果
Table 3 Bootstrap sampling test results

路径	估计值	SE	95% BCa 置信区间	P 值
接管模式→路面状况	0.093	0.057	[0.040, 0.281]	0.002
接管模式→天气(多云)	0.128	0.051	[0.080, 0.301]	0.000
接管模式→天气(雨)	0.006	0.088	[-0.178, 0.189]	0.869
接管模式→碰撞(左后方)	0.105	0.053	[0.006, 0.213]	0.026
接管模式→照明(白天)	-0.161	0.045	[-0.239, -0.058]	0.000
事故严重程度→接管模式	-0.119	0.043	[-0.179, -0.009]	0.034
事故严重程度→街道	-0.191	0.046	[-0.247, -0.062]	0.001
事故严重程度→交叉路口	-0.246	0.040	[-0.268, -0.103]	0.000

4 模型结果分析

4.1 模型结果

以自动驾驶汽车接管模式和事故严重程度同时作为潜变量对模型进行估计,所设置的 17 个观测变量中有 7 个对自动驾驶汽车事故严重程度和接管模式具有显著影响,其中路面状况、天气(多云)、天气(雨)、碰撞(左后方)和照明(白天)5 个观测变量对接管模式具有显著影响;道路类型(街道)、道路类型(交叉路口)和接管模式对事故严重程度具有直接显著作用。详细数据如表 4 和图 1 所示,图 1 中,箭头上数字为路径系数; δ_1 、 δ_2 、 δ_3 、 δ_4 、 δ_5 、 θ_1 、 θ_2 均为误差项。

表 4 结构方程模型估计结果

Table 4 Estimation results of structural equation models

路径	估计值	SE	Z 值	P 值
接管模式→路面状况	5.296	0.310	17.100	0.000
接管模式→天气(多云)	1.113	0.534	2.087	0.037
接管模式→天气(雨)	-4.384	0.311	-14.095	0.000
接管模式→碰撞(左后方)	0.414	0.195	2.128	0.033
接管模式→照明(白天)	-0.543	0.174	-3.121	0.002
事故严重程度→接管模式	-0.153	0.077	-1.992	0.046
事故严重程度→街道	-0.719	0.226	-3.185	0.001
事故严重程度→交叉路口	-0.775	0.218	-3.551	0.000

4.2 中介效应分析

为探究自动驾驶汽车发生事故时的接管模式与事故严重程度之间的关联性以及其他变量对事故严重程度所产生的作用关系,根据结构方程模型的结果选用接管模式作用中介变量,事故严重程度作为因变量,分别对 7 个观测变量进行中介效应分析以探究它们对事故严重程度的因果关系及显著性,并通过中介效应公式计算得出最终影响因素关系图(见图 2),其中,图下方 X 轴第一行

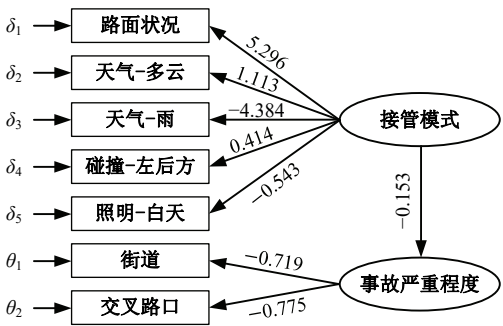


图 1 结构方程模型结果路径图
Fig. 1 Structural equation modelling result path

代表事故严重程度相关影响变量;第 2 行表示影响载荷数值;左侧 Y 轴数值对应标准影响载荷正负值。中介效应结果表明,7 个变量中路面状况、天气(多云)、天气(雨)和照明(白天)4 个变量对事故严重程度仅存在中介因果效应;交叉路口对事故严重程度仅存在直接因果效应;碰撞左后方和街道对事故严重程度同时存在中介因果效应和直接因果效应。具体结果数据见表 5。

4.3 间接影响因素分析

根据结构方程模型结果数据,通过中介效应分析计算得出:路面状况、天气(多云)、天气(雨)、碰撞(左后方)和照明(白天)5 个影响因素通过接管模式的中介效应对自动驾驶事故严重程度产生间接影响,其中,路面状况和天气(雨)对事故严重程度的影响载荷较大,分别为-0.81 和 0.671;然后,依次是天气(多云)、照明(白天)和碰撞(左后方),影响载荷分别是-0.17、0.083、-0.064。路面状况、天气(雨)和照明(白天)3 个变量对接管模式的直接影响显著性较高,彼此之间的 P 值均小于 0.01;路面状况、天气(雨)、天气(多云)和照明(白天)通过接管模式的中介效应对事故严重程度的影响显著性较高,P 值均处于 0.01 上下;碰撞(左后方)对事故严重程度的中介影响显著系数

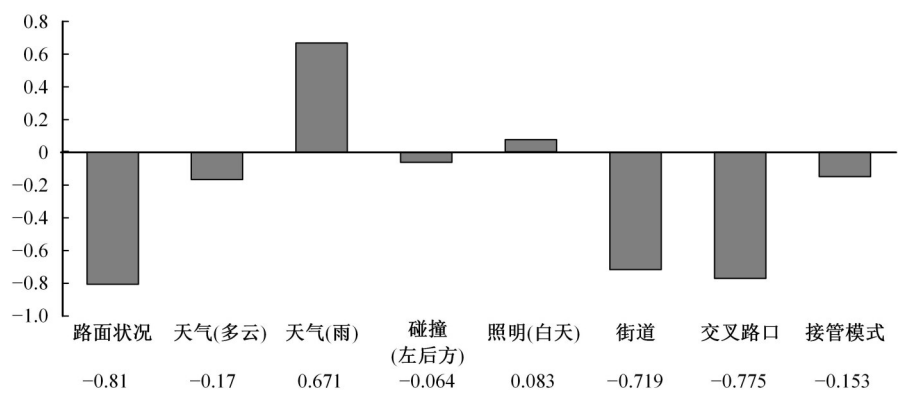


图 2 交通事故严重程度影响变量关系图

Fig. 2 Factors affecting the severity of traffic accidents

表 5 中介效应检验结果

Table 5 Results of the mediation effect test

变量	ACME		ADE		PM	
	估计值	P 值	估计值	P 值	估计值	P 值
路面状况	−0.030 1	0.012	0.063 1	0.436	−0.911 8	0.718
天气(多云)	−0.031 8	0.004	0.077 2	0.318	−0.699 0	0.602
天气(雨)	−0.026 4	0.014	0.085 8	0.348	−0.444 8	0.556
碰撞(左后方)	−0.012 8	0.042	−0.088 0	0.020	0.126 9	0.046
照明(白天)	0.017 9	0.010	0.035 1	0.350	0.337 4	0.130
街道	−0.021 2	0.016	−0.065 9	0.074	0.243 7	0.032
交叉路口	0.006 0	0.330	−0.122 2	0.000	−0.051 4	0.330

(P 值)为 0.042,影响显著性明显低于其余 4 个变量。5 个间接影响变量中,只有天气(雨)和照明(白天)对事故严重程度的影响为正,其余均为负影响关系。结果证实了外界环境因素对自动驾驶汽车接管模式和事故严重程度均具有显著影响^[15,16],同时说明自动驾驶汽车接管模式与交通事故严重程度之间具有显著且复杂的关联性。

4.4 直接影响因素分析

结果数据显示,所选取的 17 个自变量中对事故严重程度具有直接影响的显著性因素有 3 个:接管模式、街道和交叉路口。3 个显著影响变量与事故严重程度之间均为负影响关系,进一步说明它们具有降低自动驾驶汽车事故严重程度的作用,其中街道和交叉口的影响较接管模式更为显著,影响程度最大的是交叉路口,其次是街道,最后是接管模式,载荷系数分别为 -0.775 、 -0.719 、 -0.153 。街道不仅对事故严重程度具有直接影响,通过中介效应还证实了二者之间具有间接影响关系。该结果不仅证实了道路类型与事故严重程度之间的强相关性,还进一步突出接管模式对自动驾驶汽车发生事故时的严重程度具有显著负影响关系。

5 结 论

(1)考虑中介效应的结构方程模型不仅能够通过路径和因子分析评估变量之间的关系,还可以探究中介变量在自变量和因变量之间的间接作用。有利于更全面地解释自动驾驶汽车接管模式与事故严重程度之间存在的关联性。

(2)道路类型和外界环境因素对自动驾驶交通事故严重程度具有较强的负影响关系,说明自动驾驶汽车在面对复杂的道路类型和恶劣的外界环境时表现更加敏感,不易发生较为严重的交通事故。天气环境因素对自动驾驶汽车接管模式表现出强相关性,进一步证实了之前有关自动化汽车接管影响因素的研究结论。

(3)本文研究结果可为自动驾驶汽车系统研发提供理论依据,有利于相关传统驾驶汽车和自动驾驶汽车的事故严重程度影响因素的分析对比。同时,揭示了自动驾驶汽车发生事故时接管模式和事故严重程度之间的因果关系,并证明了其他变量可以通过二者的关联性产生相关作用。

(4)本研究数据采用来自美国的 AVOID 数据集,具有一定的地域局限性且样本数量较少。

不同地域在交通规则、基础设施和驾驶习惯等面上的差异,可能会影响碰撞区域、道路类型等关键因素与事故严重程度之间的效应值和显著性,还直接影响到研究结论的普遍适用性。未来研究亟需纳入更广泛地域来源的自动驾驶事故数据,以不断验证和修正模型。

参考文献:

- [1] 李立,徐志刚,赵祥模,等. 智能网联汽车运动规划方法研究综述[J]. 中国公路学报, 2019, 32(6): 20-33.
Li Li, Xu Zhi-gang, Zhao Xiang-mo, et al. Review on motion planning methods of intelligent and connected vehicles[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(6): 20-33.
- [2] J3016_201401. Taxonomy and definitions for terms related to on-road motor vehicle automated driving systems[S].
- [3] Lym Y, Chen Z. Influence of built environment on the severity of vehicle crashes caused by distracted driving: a multi-state comparison[J]. Accident Analysis & Prevention, 2021, 150: No. 105920.
- [4] Islam S, Jones S L. Pedestrian at-fault crashes on rural and urban roadways in Alabama[J]. Accident Analysis & Prevention, 2014, 72: 267-276.
- [5] 潘义勇,吴静婷,施颖,等. 建成环境对老年人交通事故严重程度异质性影响[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(3): 224-230.
Pan Yi-yong, Wu Jing-ting, Shi Ying, et al. Heterogeneous effects of built environment on elderly traffic accident injury severities[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(3): 224-230.
- [6] Hou Q, Huo X, Leng J, et al. Examination of driver injury severity in freeway single-vehicle crashes using a mixed logit model with heterogeneity-in-means[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2019, 531: No. 121760.
- [7] Chen C, Zhang G, Liu X C, et al. Driver injury severity outcome analysis in rural interstate highway crashes: a two-level Bayesian logistic regression interpretation[J]. Accident Analysis & Prevention, 2016, 97: 69-78.
- [8] 陈坚,邱智宣,彭涛,等. 建成环境对城市交通事故严重程度影响研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2023, 42(3): 105-111, 150.
Chen Jian, Qiu Zhi-xuan, Peng Tao, et al. Influence of built environment on the severity of urban traffic accidents[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2023, 42(3): 105-111, 150.
- [9] Khattak Z H, Fontaine M D, Smith B L. Exploratory investigation of disengagements and crashes in autonomous vehicles under mixed traffic: an endogenous switching regime framework[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 22(12): 7485-7495.
- [10] 赵丹,马社强,张雨萌,等. 农村公路交叉口交通事故特征关联性与风险因素分析[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(7): 146-151.
Zhao Dan, Ma She-qiang, Zhang Yu-meng, et al. Correlation and risk factors analysis of traffic crash at intersections on rural highways[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(7): 146-151.
- [11] 刘强,严修,谢谦,等. 基于事故综合强度的公交事故严重程度分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(6): 152-159.
Liu Qiang, Yan Xiu, Xie Qian, et al. Bus accident severity analysis based on comprehensive accident intensity[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(6): 152-159.
- [12] Jin M, Lu G, Chen F, et al. Modeling takeover behavior in level 3 automated driving via a structural equation model: considering the mediating role of trust[J]. Accident Analysis & Prevention, 2021, 157: No. 106156.
- [13] Sinha A, Vu V, Chand S, et al. A crash injury model involving autonomous vehicle: investigating of crash and disengagement reports[J]. Sustainability, 2021, 13(14): No. 7938.
- [14] Zheng O, Abdel-Aty M, Wang Z, et al. Avoid: autonomous vehicle operation incident dataset across the globe[J/OL]. [2024-01-05]. <https://arxiv.org/pdf/2303.12889>.
- [15] Zhang Y, Carballo A, Yang H, et al. Perception and sensing for autonomous vehicles under adverse weather conditions: a survey[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2023, 196: 146-177.
- [16] Wu Q, Zhang G, Zhu X, et al. Analysis of driver injury severity in single-vehicle crashes on rural and urban roadways[J]. Accident Analysis & Prevention, 2016, 94: 35-45.