

文章编号: 1009-6094(2022)01-0271-10

高峰期电动二轮车驾驶人事故 伤害致因及随机参数分析*

朱彤¹, 朱稀硕¹, 张杰², 肖丹蕾¹, 李青¹

(1 长安大学运输工程学院, 西安 710064;

2 交通运输部公路科学研究院道路交通安全
研究中心, 北京 100088)

摘要: 电动二轮车是我国高峰时段最主要的通勤工具之一。为了研究高峰时段电动二轮车驾驶人事故伤害独特的伤害致因机理, 首先, 通过独立建模检验 (Model separation test) 发现高峰时段交通事故伤害严重程度数据特征相比平峰时段有明显差异, 应针对高峰时段独立建模; 其次, 基于发生在某市的 2 142 起电动车与机动车相撞交通事故数据, 以事故弱势方电动车驾驶人伤害严重程度为因变量, 从双方驾驶人属性、车辆属性与碰撞前运动方向及道路环境因素等方面选取 25 个自变量进行分析, 同时采用随机参数模型进行研究, 以更好地解释数据中未能观测到的异质性; 最后, 根据边际效应获取各显著因素对于电动二轮车驾驶人伤害程度的直接影响。结果表明, 在高峰时段, 电动二轮车驾驶人性别、涉事机动车车型、碰撞前机动车运动方向及道路环境均会对电动二轮车驾驶人伤害程度造成显著性影响, 其中, 低能见度是服从正态分布的随机参数, 即低能见度对电动二轮车驾驶人的伤害严重程度存在异质性影响, 此外, 机动车转向运动情况下驾驶人受重伤的可能性较低。研究结果为高峰时段二轮车的交通管理对策制定提供了更具针对性的参考。

关键词: 安全社会工程; 电动二轮车; 交通事故; 伤害严重程度; 随机参数模型

中图分类号: X951 文献标志码: A

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2021.1365

0 引言

高峰时段是通勤者的事故多发期^[1-3]。研究表明, 高峰时段内更有可能造成交通参与者严重伤害及财产损失。因此, 相应的管理和设施配置应根据高峰时段的特点及影响因素进行调整, 而非简单地进行一致化设置。为全面提高各通勤者的交通安全, 研究高峰时段交通参与者在事故中受伤情况的影响因素是十分必要的。然而, 很少有研究直接针

对高峰时段进行相关的事故分析, 但有部分研究探讨了不同时段交通事故伤害差异性。2005年, Khorashadi等^[4]首次提出分时段研究市中心事故驾驶人伤害情况, 结果表明, 不同时段对驾驶人受伤的可能性影响是具有显著差异的。柳林等^[5]讨论了国内某城市中心城区空间结构对交通事故影响的时间差异。Behnood等^[6]在大车事故驾驶人伤害严重程度的研究中同样发现了时间异质性。综上所述, 以往研究已发现在不同时段事故伤害程度致因机理存在差异, 但并未有研究针对高峰期时段的事事故伤害致因进行系统的讨论。

近年来, 电动车以其速度快、可达性高成为我国主流的高峰时段交通工具之一^[7]。国家统计局数据显示, 截至2019年, 我国每100户家庭便拥有59辆电动二轮车^[8]。2013—2017年, 我国电动二轮车的碰撞事故导致约56 200人受伤、8 431人死亡, 因此电动自行车的交通安全不容忽视^[9]。其中, 约71.01%的致命事故是由机动车造成的^[10], 这表明机动车与电动二轮车的碰撞事故值得进一步研究。Nie等^[11]利用深度事故重建及验证性有限元模型研究了电动车驾驶人头部损伤, 结果表明, 车辆碰撞速度越高, 对电动车驾驶人造成伤害的风险越高。还有一些研究利用基础的统计分析方法研究了电动车驾驶人行为。2018年, 李威等^[12]研究了不同因素对电动二轮车头部损伤的影响, 首次进行了影响电动二轮车驾驶人最终位置的敏感参数排序。温惠英等^[13]对摩托车驾驶人伤害原因进行了讨论, 结果表明, 驾驶员性别、年龄、是否使用头盔、是否酒驾等因素与摩托车单车碰撞事故伤害严重程度显著相关。周华等^[14]研究了不同车型与电动车发生碰撞的事故再现, 得出了5类符合中国道路交通情况的十字路口乘用车与电动车典型危险场景。然而, 国内外相关研究很少进一步讨论电动二轮车驾驶人伤害严重程度及其影响因素。

针对事故人员伤害程度的研究大多采用传统固定参数模型。然而这类模型易忽视不同人员间未能观测到的差异, 进一步造成错误的估计结果, 从而提出错误的优化建议^[15-16]。起初, 损伤严重程度被划分为不同等级, 如轻伤、重伤等, 1996年, Mannering^[17]首次使用多项Logit模型检查摩托车驾驶人损伤的严重程度, 结果表明, 环境因素等均会显著影响摩托车驾驶人伤害情况。然而, 该模型无法保证无关变量的独立性假设限制 (IIA)。之后, 为了摆脱这一限制, 嵌套Logit模型和有序Logit模型逐

* 收稿日期: 2021-08-06

作者简介: 朱彤, 副教授, 博士, 从事交通安全研究, zhutong@chd.edu.cn。

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFE0108000)

渐被研究者使用。胡骥等^[18]运用有序 Logit 模型及有序 Probit 模型分析了翻车事故驾驶人伤害影响因素。然而,受数据收集的限制,研究人员无法获得与事故人员伤害严重程度相关因素的异质性影响。为捕捉未观察到的异质性影响,2008 年,Milton 等^[16]首次在事故伤害严重程度研究中引入随机参数分析思想,通过假定变量对于不同被试者有不同影响可以从异质性的角度一定程度上捕捉到未观察到的数据特征,以便确定真正影响事故人员伤害程度的因素及相关关系。然而,前人对于随机参数模型的应用主要聚焦于汽车事故,该模型在二轮车事故分析中应用较少。

本文采用随机参数模型,以高峰时段发生的电动车-机动车碰撞事故为研究对象,结合边际效应定量分析各显著因素对电动车驾驶人伤害严重程度的影响,以期为高峰时段的交通管理及优化提供理论依据,为有关部门制定减少高峰时段电动车事故的对策措施提供一定的理论支持。

1 数据来源与变量描述

以国内某市 2008—2017 年在高峰时段发生的电动车-机动车碰撞事故为研究对象(数据源于当地交通管理部门汇总的各年度事故报表,涉及电动二轮车的碰撞事故均由身处事故一线的交警统一记录和上报)。共提取了 2 142 起事故,其中包括 62 起无伤事故(仅财产损失)、1 469 起轻伤事故、367 起重伤事故及 244 起死亡事故。具体数据见表 1。

需要特别说明的是,本文提取事故的标准是该市发生在上午 6—9 时或下午 4—7 时的电动车-机动车碰撞事故。Downs^[3]提到高峰时段及拥堵情况主要发生在上午 6—9 时和下午 4—7 时,结合前期在该市进行走访调查主城区普遍上下班时间、上学放学时间及该市主要街道开始长期且稳定的拥堵状况所在时段,认为这个时段选取标准是合理的。

2 独立建模检验

为确定是否需要高峰时段交通事故数据进行单独建模,根据 Washington 等^[19]提出的可转移性理论(Transferability),需进行两个检验。

首先进行总体模型与高峰时段模型的对数似然比检验(Log-likelihood ratio test),如下。

$$R_{\text{总体}} = -2 [L(\beta_{\text{总体}}) - L(\beta_{\text{高峰}}) - L(\beta_{\text{平峰}})] \quad (1)$$

式中 $R_{\text{总体}}$ 为包含高峰时段和平峰时段数据的总体

模型与高峰时段模型的收敛时对数似然比 $L(\beta_{\text{总体}})$ 是用包含高峰时段和平峰时段数据的总体数据进行模型估计的收敛时对数似然值 $L(\beta_{\text{高峰}})$ 是用高峰时段事故数据进行模型估计的收敛时对数似然值, $L(\beta_{\text{平峰}})$ 是用平峰时段事故数据进行模型估计的收敛时对数似然值。在第一个检验中 3 个模型(总体模型、高峰时段模型及平峰时段模型)采用同样的指标变量。 $R_{\text{总体}}$ 为自由度(df)等于高峰时段模型参数个数与平峰时段模型参数个数之和减去总体模型参数个数的 χ^2 分布,该值用于提供否定原假设(总体模型与高峰时段模型参数相同)的置信水平。

其次,进行参数可传递性检验(Parameter transferability test)。该检验基于第一个检验,用于明确是否需要针对高峰时段事故数据进行独立建模,如下。

$$R_{ab} = -2 [L(\beta_{ab}) - L(\beta_a)] \quad (2)$$

式中 a 和 b 分别代表高峰时段或平峰时段, R_{ab} 为利用 b 的数据在 a 的模型中进行回归与利用 a 的数据在 a 的模型中进行回归的模型收敛时对数似然比 $L(\beta_{ab})$ 为利用 b 的数据在 a 的模型中进行回归的模型收敛时对数似然值 $L(\beta_a)$ 为利用 a 的数据在 a 的模型中进行回归的模型收敛时对数似然值。

首先,由对数似然检验可知,本文中 $R_{\text{总体}}$ 为 128.77(df = 32, $p < 0.001$) $p < 0.001$ 表明高峰时段应单独建模,其置信度超过 99%。其次,由参数可传递性检验结果(见表 2)可知,副对角线上两个模型收敛时的对数似然比(365.24252 ≠ 493.37584)及自由度(df)(40 ≠ 43)完全不同,这意味着利用高峰时段的数据在平峰时段模型中运行的结果及相关变量与用平峰时段的数据在高峰时段模型中运行的结果及相关变量有显著差异,其置信度均超过 99%。综上所述,需要针对高峰时段事故数据进行独立建模。

3 模型构建

3.1 随机参数模型

实际采集的事故数据往往不能抓住所有影响事故发生及其严重程度的因素^[6]。尽管在事故发生后数据采集人员已尽可能将事故相关的可见指标记录入册,但仍有大量无法定量的或不可见指标存在并显著影响事故的严重程度,如驾驶人对危险的感知、驾驶人的冒险精神及对道路的个人偏向性等异质性因素^[2]。为了深刻理解这些异质性因素对事故严重程度的影响,使用随机参数模型进行研究。随机

表 1 自变量描述性统计
Table 1 Descriptive statistics of independent variables

变量	选项	事故比例 / %	变量	选项	事故比例 / %
机动车驾驶人性别	女*	91.0	是否处于交通管制区域	否*	81.8
	男	9.0		是	18.2
电动车驾驶人性别	女*	71.1	路侧防护装置	无装置*	60.2
	男	28.9		行道树	13.9
电动车驾驶人年龄	18 岁以下*	1.3		绿化带	13.4
	18 ~ 30 岁	18.4		护栏	7.4
	31 ~ 40 岁	20.2		应急坡道	5.1
	41 ~ 50 岁	23.6	路面是否完好	完好*	98.7
	50 岁以上	36.5		破损	1.3
机动车驾驶人年龄	18 ~ 30 岁*	35.9	路面是否干燥	干燥*	89.4
	31 ~ 40 岁	33.1		潮湿	10.6
	41 ~ 50 岁	24.1	是否为柏油路	是*	91.8
	50 岁以上	6.9		否	8.2
机动车驾驶人驾龄	1 ~ 5 年*	21.5	是否发生在交叉路口	是*	20.6
	6 ~ 10 年	26.1		否	79.4
	11 ~ 15 年	41.2	道路线型	平直*	89.6
	超过 15 年	11.2		曲折	10.4
机动车是否投保	是*	99.0	道路类型	普通城市道路*	57.9
	否	1.0		等级公路	28.4
机动车车型	轿车*	73.8		其他城市道路	13.7
	客车	6.0	天气	晴朗*	78.4
	卡车	17.9		多云	13.3
	摩托车	2.2		下雨	7.1
机动车车况	正常*	98.9		下雪或冰雹	1.3
	异常	1.1	能见度	> 200 m*	48.9
机动车是否超载	超载*	1.6		> 100 ~ 200 m	22.6
	未超载	98.4		> 50 ~ 100 m	19.7
机动车碰撞前行驶方向	直行*	76.4		≤ 50 m	8.8
	掉头	2.5	道路是否平坦	是*	97.0
	左转	9.9		否	3.0
	右转	11.2	道路照明情况	白天*	70.1
事故发生是否处于工作日内	是*	73.1		晚间有路灯照明	19.8
	否	26.9		晚间无路灯照明	7.2
				黎明或黄昏	2.3

注: * 代表参考类别。

参数模型已成功应用于其他安全性研究领域,提供了深层的安全性优化建议与对策^[19-21]。

首先,将电动二轮车驾驶人事故伤害严重程度分为4个类别:无伤(仅财产损失)、轻伤(伤害可见但不丧失能力)、重伤(丧失能力)及死亡。为确定电动二轮车驾驶人事故伤害严重程度,定义了伤害确定函数(效用函数),如下。

$$F_{ik} = \beta_{ik} X_{ik} + \varepsilon_{ik} \quad (3)$$

式中 F_{ik} 表示第 k 个电动二轮车驾驶人伤害程度为 i 时的效用函数值($i = 1$ 为轻伤(对照组) 2 为无伤 3 为重伤 4 为死亡), X_{ik} 表示影响因素, β_{ik} 为各影响因素对应的回归系数, ε_{ik} 为误差项。

其次,为估计造成电动二轮车驾驶人各类损伤的概率,假设式(1)中误差项 ε_{ik} 为极值分布,则标准多项 Logit 模型公式为

$$P_{ik} = \frac{\exp[\beta_{ik} X_{ik}]}{\sum_{i \in I} \exp[\beta_{ik} X_{ik}]} \quad (4)$$

式中 P_{ik} 为第 k 个电动二轮车驾驶人伤害程度为 i 时的概率,此时各回归系数 β_{ik} 均为固定值。然而实际上各因素对电动二轮车驾驶人伤害严重程度的影响是可能因个体差异而发生变化的。因此将式(3)中的误差项 ε_{ik} 假设为广义极值分布,即将标准多项 Logit 模型变为随机参数模型,以此考虑参数对于不同驾驶人伤害严重程度的影响所存在的差异,则所求概率变为以下形式,见式(5)。

$$P_{ik} = \int \frac{\exp[\beta_{ik} X_{ik}]}{\sum_{i \in I} \exp[\beta_{ik} X_{ik}]} f(\beta_{ik} | \phi) d\beta_{ik} \quad (5)$$

式中 $f(\beta_{ik} | \phi)$ 为回归系数 β_{ik} 的概率密度函数, ϕ 为描述密度函数的参数向量(均值及标准差)。

有研究表明 Halton 抽样能保证以更少的抽样时间实现更快的收敛,因此本文采用 Halton 抽样。此外,本文尝试了常用的随机参数分布类型,包括正态分布、均匀分布及对数正态分布,最终正态分布拟合效果最好,因此采用正态分布作为随机参数分布。

3.2 边际效应

由于随机参数模型参数本质为 Logit 模型,此类

模型的参数估计值仅能反映自变量对因变量某个分类水平的影响趋势,无法定量解释各自变量对因变量各分类水平的具体影响,因此本文引入边际效应定量确定不同显著因素对电动二轮车驾驶人受伤严重程度的影响。边际效应公式为

$$\frac{\partial P_{ik}}{\partial X_{ik}} = \beta_{ik} P_{ik} (1 - P_{ik}) \quad (6)$$

边际效应表明了因素 X_{ik} 每增加 1 个单位对所求概率 P_{ik} 的影响大小。

4 结果与讨论

4.1 参数选取方法及估计结果

利用统计分析软件 NLOGIT 5.0 进行标准多项 Logit 模型分析。经过多种目前常用抽样次数的尝试,最终采用 200 次的 Halton 抽样以获得更贴合数据总体分布的样本并有利于准确地进行参数估计。此外,在模型估计过程中,正态分布被证明是最适合本数据的假设分布形式,这与众多同类研究所用分布一致^[16]。如表 3 所示,麦克法登伪 ρ^2 (ρ^2) 为定性选择行为的条件对数分析值, AIC 和 BIC 分别为赤池信息准则和贝叶斯信息准则。麦克法登伪 ρ^2 越大、AIC 及 BIC 值越小则表明模型具有更好的拟合优度。由此可知,本文中随机参数模型比固定参数模型具有更好的模型拟合度,具体体现在随机参数模型具有更高的麦克法登伪 ρ^2 值(ρ^2) 及更低的 AIC 和 BIC 值。

模型估计结果见表 4~7。变量分类展示了各显著变量,变量后方括号中的内容是指该显著变量是在该伤害等级下产生的;参数估计值表示各显著的解释变量对于因变量的影响,参数为正值意味着该因素更容易造成该伤害严重程度,反之参数为负值则表明该参数不易造成该伤害严重程度; t 与 p 用于判断变量是否显著,其中 t 代表 t 检验结果, p 代表该检验的显著性水平,在 t 检验中若 p 小于 0.1 即可判定该变量为显著变量。表 4~7 仅保留显著变量进行解释与讨论。由于 Logit 模型中估计的参数只能反映各因素对事故伤害程度影响的趋势(正负影响),而不能直接反映该影响的程度,因此加入边

表 2 参数可传递性检验 R_{ab}

Table 2 Parameter transferability test R_{ab}

	高峰时段	平峰时段
高峰时段	0	365.242 52 , $df = 40 (p < 0.001)$
平峰时段	493.375 84 , $df = 43 (p < 0.001)$	0

表 3 随机参数模型的评价结果

Table 3 Estimation results of random parameter model

模型	样本数	ρ^2	AIC	BIC
固定参数模型	2 141	0.455	3 407.2	3 528.6
随机参数模型	2 141	0.564	3 300.7	3 492.3

际效应来表征各显著因素对因变量的影响程度。

表 4~7 中显著性水平为 0.1,保留显著性水平低于 0.1 的变量为显著变量,之后将所有显著变量保留并视作待估计的随机参数。若待估计的随机参数的参数估计值及标准差估计值均在统计意义上显著,则认为该待估计参数为正态分布的随机参数,否则该参数退化为固定参数^[15]。

4.2 随机参数及其影响作用

传统回归模型的参数估计值是固定的,然而由于未观察到的异质性因素,部分参数对研究对象的影响更适宜用一个数学分布而非一个固定值来表示。用数学分布的形式可以更好地观测该变量是否会因为被试差异而产生显著不同的结果,即研究同一变量对研究对象的影响,一部分被试是正向的,而另一部分被试是负向的,即同一变量可能会造成一部分研究对象受到某一类伤害的概率增大,而同时该变量也会造成剩下研究对象受到该类伤害的概率减小。相比固定参数仅能粗略地表示与实际不符的单一响应,随机参数的出现弥补了固定参数的不足,即检验出部分变量对研究对象的影响因被试不同可能造成估计差异并以分布的形式形象刻画了该差异。因此,在模型构建过程中对回归参数进行逐一检验,通过检验则为随机参数,反之退化为固定参数。其中,随机参数又根据其随机特性分为正态分布、均匀分布等。具体将随机参数确定为何种分布需依据研究数据集能否显著通过分布回归假设进行判定。

如表 4 所示,在模型的参数中有两个参数被判定为随机参数,其余为固定参数。被判定为随机参数的两个低能见度因素在致重伤的条件下显著性通过正态分布的假设(显著性水平均为 0.05),分别是能见度为 >50~100 m 及 >100~200 m。这意味着在所有重伤事故中,两类能见度对不同电动二轮车驾驶人的影响是具有显著性差异的,且该影响满足

0.05 显著性水平下的正态分布假设。为体现随机参数与固定参数的区别,表 4 中括号内数值为同一因素仅被估计为固定参数时的结果。

对于能见度为 >50~100 m 的指标而言,模型结果表明其均值为 -2.181,标准差为 2.348。由正态分布概率密度函数可知约 72.96% 的电动二轮车驾驶人在能见度为 >50~100 m 的情况下发生碰撞,但造成重伤的可能性降低(见图 1)。若不考虑随机参数假设,能见度为 >50~100 m 这一指标仅能被单一地理解为所有驾驶人在此情况下驾驶造成重伤的可能性都会增加。对于能见度为 >100~200 m 的指标而言,模型结果表明其均值为 -1.797,标准差为 2.023。由正态分布概率密度函数可知约 73.38% 的电动二轮车驾驶人在能见度为 >100~200 m 的情况下发生碰撞,但造成重伤的可能性同样降低了(见图 2)。同样,若不考虑随机参数假设,这一指标也仅能被单一地看作造成全体驾驶人受重伤的可能性增加的依据,而这与实际观测的样本结果相悖。为刻画真实情况下不同驾驶人对低能见度变量的动态响应情况,考虑随机参数假设是十分有必要的。

上述结果表明,高峰时段内低能见度能一定程度地提高大部分碰撞事故中电动二轮车驾驶人免受重伤的可能性。这与大多数研究结果是相反的,前人普遍认为能见度较低一定会导致严重事故的发生^[21]。有研究表明这可能是因为低能见度环境会降低双方驾驶人视野,进而导致驾驶人更加谨慎并主动降低车速^[22]。然而在少数碰撞事故中,面对朦胧模糊的驾驶环境,驾驶人更喜欢采取滞后制动或不太有效的避让动作。在这样的情况下,电动二轮车驾驶人更容易受重伤。

边际效应表明两个低能见度指标每增加 1 个单位,电动二轮车驾驶人受重伤的可能性分别降低 0.001 8 及 0.007 9。能见度为 >100~200 m 对降

表 4 随机参数的参数估计结果及边际效应分析

Table 4 Parameter estimation results and marginal effects of random parameter

显著影响因素	参数估计值	<i>t</i>	<i>p</i>	边际效应值
能见度 >50~100 m [I+]	-2.181 (0.725)	-2.25 (2.01)	0.027 2 (0.020 4)	-0.001 8 (0.001 2)
参数分布的标准差	2.348	2.32	0.012 9	
能见度 >100~200 m [I+]	-1.797 (0.433)	-2.36 (2.15)	0.014 9 (0.019 8)	-0.007 9 (0.001 6)
参数分布的标准差	2.023	2.24	0.001 6	

注 [I+]代表重伤。

低电动二轮车驾驶人受重伤可能性的效果更好,这可能是因为200 m能见度可为驾驶人提供更加清晰的视野,以便双方驾驶人提前看到彼此并能提前采取制动与避让,从而避免严重事故的发生。

两类低能见度指标均使大部分碰撞事故中电动二轮车驾驶人受重伤的可能性降低,然而依旧存在近30%的事故中驾驶人受重伤的可能性增加。这表明面对低能见度的环境,驾驶人可能采取不同的应对措施,而采取措施的快慢也会影响交通事故后果的差异。因此,本文建议当处于高峰时段出行的驾驶人即将进入低能见度区域驾驶时,相关部门要提前予以“低能见度区域即将到来”等信息的提醒与警示,以便驾驶人提前采取应对措施,更加安全地通过低能见度区域。

4.3 驾驶人特征

对于驾驶人特征而言,仅有电动二轮车驾驶人性别这一指标会对电动二轮车驾驶人受伤严重程度

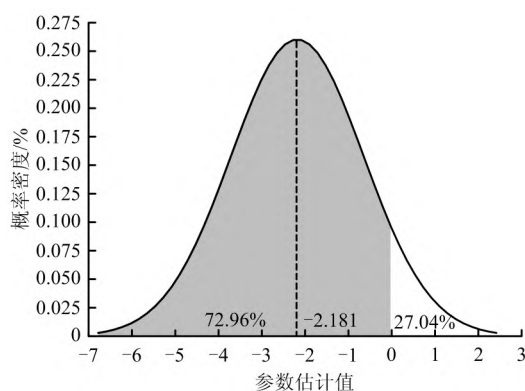


图1 能见度为>50~100 m的参数分布(重伤事故)

Fig. 1 Parameter distribution of >50~100 m visibility indicator for severe injury

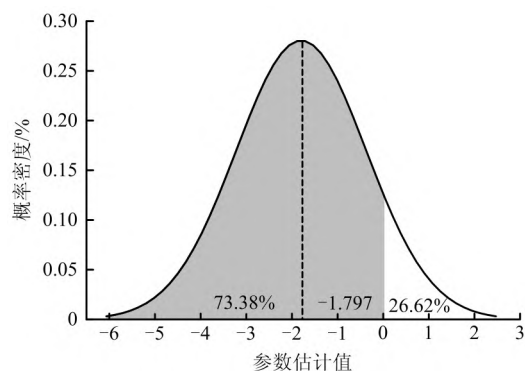


图2 能见度为>100~200 m的参数分布(重伤事故)

Fig. 2 Parameter distribution of >100~200 m visibility indicator for severe injury

产生显著性影响。模型结果表明,当电动二轮车驾驶人为女性时,其不受伤的可能性会显著提高(1.246 $p = 0.0022$)。边际效应为0.029 8,即相比男性二轮车驾驶人,女性使驾驶人不受伤的可能性提高了0.029 8。这与人研究^[12]一致。这是因为女性驾驶人对环境及危险感知更敏感,当遇到机动车时会采取更快及有效的制动和避让动作,从而一定程度上提高了自身驾驶安全性。

4.4 车辆特征

由表5可知,与不同车型相撞会对电动二轮车驾驶人更易造成伤害的显著性影响因素有:客车(重伤)为0.788,客车(死亡)为1.407;卡车(重伤)为1.206,卡车(死亡)为1.931。边际效应表明,当客车和卡车与电动二轮车相撞时,电动二轮车驾驶人重伤和死亡的可能性提高0.005 1~0.011 3。这表明与轿车相比,客车或卡车与电动二轮车相撞均会导致电动二轮车驾驶人更易发生重伤甚至死亡。这可能是因为客车和卡车自身体积较大,视野局限,相比轿车更难发现电动二轮车的存在^[6];由于自身保护装置单薄,当与两类大型车辆相撞时电动二轮车会受到更大的冲击,因此更易造成重大伤害。

然而,与摩托车相撞却能显著提高电动二轮车驾驶人免受伤害的可能性(1.463)。边际效应表明当摩托车与电动二轮车相撞时,电动二轮车驾驶人免于受伤的可能性显著提高0.002 9。这可能是因为摩托车体积小所带来的冲击不高^[7],可以一定程度上保护撞后电动二轮车驾驶人免于受伤。

4.5 碰撞前机动车行驶方向

特别地,碰撞前机动车不同的行驶方向也会对电动二轮车驾驶人受重伤有显著性影响。由表6可知,当机动车碰撞前处于掉头、左转或右转时与电动

表5 车辆特征参数估计结果及边际效应分析

Table 5 Parameter estimation results and marginal effects of vehicle characteristics

显著影响因素	参数估计值	t	p	边际效应值
客车[I+]	0.788	2.52	0.011 6	0.005 1
客车[I++]	1.407	5.23	****	0.011 3
卡车[I+]	1.206	6.40	****	0.046 0
卡车[I++]	1.931	10.58	****	0.051 6
摩托车[I]	1.463	2.88	0.003 9	0.002 9

注 [I]代表无伤,[I+]代表重伤,[I++]代表死亡;**** $p < 0.0001$;下同。

二轮车驾驶人发生碰撞,都会有效降低造成电动二轮车驾驶人重伤或死亡的可能性($-2.294 \sim -0.563$)。边际效应表明,3 种行驶方向对降低电动二轮车驾驶人受重伤可能性的贡献度从大到小依次为右转、左转、掉头($0.0091 > 0.0058 > 0.0016$),这样的排序同样适用于3 种行驶方向对降低死亡可能性的贡献度($0.0052 > 0.0047 > 0.0008$)。模型结果表明3 类行驶方向均能有效降低电动二轮车驾驶人受重伤或死亡的可能性,但其中右转为最有效的降低风险方式。这与大部分的认知相反,并且大部分研究从未证明这3 类行驶方向对于降低驾驶人极端伤害的显著能力^[2]。值得注意的是,在洛杉矶的一项研究中证明左转和右转是导致驾驶人严重伤害的指标^[23],本文结果与其相反。这可能与我国驾驶习惯和交通管理策略有关。在我国当机动车驾驶人向右转向时,由于右侧存在很难被观察到的视觉盲区而变得谨慎。因此,当右转时,特别是在充满其他车辆和行人的通勤期间,机动车选择减速并确保驾驶安全。然而,机动车掉头只需要驾驶人观察驾驶视线的最近位置,而不是右侧视线和前方视线。因此事实证明,任何来自右侧或前方的物体都会对正在掉头的车辆产生不确定影响。因此建议在交通高峰时段,不同的车道应分开设置,并严格控制车道互不干扰,特别是右转车道、掉头车道和自行车道。

4.6 道路与环境特征

本文研究还发现道路及环境特征同样会对电动

二轮车的行车安全产生显著性影响。首先,就道路设置而言,当碰撞发生在交通管制区、有路侧保护装置(行道树及护栏)及交叉路口时,电动二轮车驾驶人更不容易造成重伤(表7 中对应指标估计值在重伤类[I+]均为负值)。此外,边际效应表明两类路侧防护装置相比,行道树比护栏的保护作用更强($0.0076 > 0.0048$)。值得一提的是,本文研究发现交叉路口相比路段对于电动二轮车驾驶人而言更为安全。这是因为交叉口虽然包含复杂的结构但具有较多信号标志牌进行限制与管理,车辆需遵守相关规则才可顺利通过,因此安全性较路段更高。

表6 碰撞前车辆行驶方向特征的
参数估计结果及边际效应分析

Table 6 Parameter estimation results and marginal effects of pre-crash vehicle movement characteristics

显著影响因素	参数估计值	<i>t</i>	<i>p</i>	边际效应值
掉头[I+]	-2.294	-2.53	0.011 4	-0.001 6
掉头[I++]	-1.887	-1.82	0.068 7	-0.000 8
左转[I+]	-2.256	-4.67	****	-0.005 8
左转[I++]	-1.380	-3.62	0.000 3	-0.004 7
右转[I+]	-1.854	-5.24	****	-0.009 1
右转[I++]	-0.563	-2.30	0.021 4	-0.005 2

表7 道路与环境特征的参数估计结果及边际效应分析

Table 7 Parameter estimation results and marginal effects of road and environmental characteristics

显著影响因素	参数估计值	<i>t</i>	<i>p</i>	边际效应值
处于交通管制区域[I+]	-0.669	-2.82	0.004 7	-0.008 0
行道树[I+]	-0.915	-3.34	0.000 8	-0.007 6
护栏[I+]	-1.343	-3.22	0.001 3	-0.004 8
未发生在交叉路口[I+]	1.100	4.11	****	0.093 7
道路线型曲折[I+]	1.074	2.78	0.005 5	0.097 6
等级公路[I+]	0.527	2.38	0.017 3	0.008 4
等级公路[I++]	0.786	5.03	****	0.028 4
其他城市道路[I+]	0.684	3.31	0.000 9	0.011 2
能见度50 米以下[I]	0.884	2.43	0.015 1	0.003 8
晚间有路灯照明[I+]	0.413	2.23	0.025 5	0.008 6
晚间无路灯照明[I+]	0.691	2.23	0.026 1	0.004 8

相反地,当碰撞发生在曲折道路、等级公路及其他城市道路上时,电动二轮车驾驶人更易受重伤甚至死亡(表7中对应指标估计值在重伤类[I+]和死亡类[I++]均为正值)。边际效应表明,等级公路和其他城市道路相比一般城市道路导致电动二轮车驾驶人受重伤的可能性显著增加0.008 4~0.028 4。其中,等级公路导致电动二轮车驾驶人受重伤的可能性显著增加0.008 4,死亡的可能性增加0.028 4。这是因为高峰时段内等级公路上行驶的车辆通常需要跨市区通勤,而等级公路由于无对向车道干扰普遍车速较快,进而导致严重事故更容易发生。

就环境特征而言,当电动二轮车驾驶人在能见度低于50 m的条件下行驶时,电动二轮车驾驶人不受伤的可能性增大(0.884)。边际效应表明当能见度低于50 m时每增加1个单位(即能见度越低),电动二轮车驾驶人不受伤的可能性增加0.003 8。换言之当能见度低于50 m时电动二轮车驾驶人发生重伤的可能性显著降低了,这与随机参数部分的讨论结果一致。

与此相反,晚高峰时段内无论是否有路灯照明均会显著增加电动二轮车驾驶人发生重伤的可能性(0.413及0.691)。边际效应表明,晚高峰时段有路灯照明时发生碰撞会增加电动二轮车驾驶人发生重伤的可能性0.008 6,而无路灯情况下仅会增加0.004 8的重伤可能性。而之前关于夜间照明的研究表明,夜间照明相比无照明对于驾驶人而言更安全^[23]。然而,本文得出了相反的结论,这可能是因为晚高峰的路灯照明可能会带来眩目与夜视力下降,此外,一天的工作必定会带来一定程度的驾驶疲劳,从而增加驾驶人的碰撞风险^[24-25]。

5 结 论

1) 采用随机参数模型分析影响高峰时段碰撞事故中电动二轮车驾驶人伤害严重程度的显著因素,发现来自驾驶人、车辆及道路环境的19个因素会对电动二轮车驾驶人伤害严重程度造成显著性影响。

2) 通过甄别随机参数发现,高峰时段内低能见度条件(能见度>50~100 m及>100~200 m)对电动二轮车驾驶人伤害严重程度的影响是变化的且该变化呈正态分布,且两类低能见度均可有效降低电动二轮车驾驶人发生重伤的可能性。

3) 当发生碰撞前机动车正处于掉头、左转或右转状态则可以有效降低电动二轮车驾驶人发生重伤的可能性。相反,晚高峰无论是否有路灯照明都会增加电动二轮车驾驶人发生重伤的可能性,甚至有路灯照明增加的可能性更大。

4) 鉴于现有交通事故数据库中对于道路因素的指向性有待提高,仍有部分道路设计因素未被纳入模型中,如能在今后的研究中进一步丰富事故记录、补充样本数量并予以深入分析,将有利于提高道路交通事故预防的精准性,进一步减轻事故伤害。

参考文献(References):

- [1] BRACH A M. Implementing the results of the second strategic highway research program: saving lives, reducing congestion, improving quality of life [J]. TR News, 2009, 261: 35-39.
- [2] KUMAR V, BHAT C R, PENDYALA R M, et al. The impacts of an incentive-based intervention on peak period traffic: experience from the Netherlands [J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2015, 2543: 166-175.
- [3] DOWNS A. Still stuck in traffic: coping with peak-hour traffic congestion [M]. Washington, D. C.: Brookings Institution Press, 2005: 153.
- [4] KHORASHADI A, NIEMEIER D, SHANKAR V, et al. Differences in rural and urban driver-injury severities in accidents involving large-trucks: an exploratory analysis [J]. Accident Analysis & Prevention, 2005, 37(5): 910-921.
- [5] 柳林,宋广文,周素红,等. 城市空间结构对惠州市中心城区交通事故影响的时间差异分析[J]. 地理科学, 2015, 35(1): 75-83.
LIU L, SONG G W, ZHOU S H, et al. Temporally impact of urban structure on city traffic accidents in Huizhou [J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(1): 75-83.
- [6] BEHNOOD A, MANNERING F. Time-of-day variations and temporal instability of factors affecting injury severities in large-truck crashes [J]. Analytic Methods in Accident Research, 2019, 23: 100102.
- [7] HUANG Y, ZHOU Q, KOELPER C, et al. Are riders of electric two-wheelers safer than bicyclists in collisions with motor vehicles [J]. Accident Analysis & Prevention, 2019, 134(1/2): 105336.

- [8] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019: 209.
China National Bureau of Statistics. China statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2019: 209.
- [9] WU Z, ZENG X, WANG L. A new traffic conflict measure for electric bicycles at intersections [J]. *Promet-Traffic & Transportation*, 2020, 32(3): 309-320.
- [10] YANG N, LI Y, LIU T, et al. Analysis of fatal factors influencing accidents involving two-wheel electric vehicle drivers at intersections [J]. *Legal Medicine*, 2020, 45(6): 101696.
- [11] NIE J, YANG J K. A study of bicyclist kinematics and injuries based on reconstruction of passenger car-bicycle accident in China [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2014, 71(10): 50-59.
- [12] 李威, 钱宇彬, 冯浩. 轿车-电动两轮车事故再现的参数敏感性研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2018, 28(5): 49-55.
LI W, QIAN Y B, FENG H. Study on sensitivities of reconstruction system to parameters for collision between sedan and electric two-wheeler [J]. *China Safety Science Journal*, 2018, 28(5): 49-55.
- [13] 温惠英, 汤左淦. 路段摩托车单车事故伤害严重程度原因分析 [J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2019, 38(2): 117-125.
WEN H Y, TANG Z G. Cause of crash injury severity in single-motorcycle crash on roadway segment [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2019, 38(2): 117-125.
- [14] 周华, 张巧玉, 母尧尧, 等. 十字路口乘用车与二轮车典型危险场景聚类及推演 [J]. *中国安全科学学报*, 2020, 30(4): 100-107.
ZHOU H, ZHANG Q Y, MU Y Y, et al. Clustering and deduction of typical dangerous scenarios between passenger vehicles and two-wheelers at crossroads [J]. *China Safety Science Journal*, 2020, 30(4): 100-107.
- [15] SERANEEPRAKARN P, HUANG S, SHANKAR V, et al. Occupant injury severities in hybrid-vehicle involved crashes: A random parameters approach with heterogeneity in means and variances [J]. *Analytic Methods in Accident Research*, 2017, 15: 41-55.
- [16] MILTON J C, SHANKAR V N, MANNERING F L. Highway accident severities and the mixed Logit model: an exploratory empirical analysis [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2008, 40(1): 260-266.
- [17] MANNERING S F. An exploratory multinomial logit analysis of single-vehicle motorcycle accident severity [J]. *Journal of Safety Research*, 1996, 27: 183-194.
- [18] 胡骥, 闫章存, 卢小钊, 等. 基于有序 Logit 与 Probit 模型的交通事故严重性影响因素分析 [J]. *安全与环境学报*, 2018, 18(3): 836-843.
HU J, YAN Z C, LU X Z, et al. Analysis for the influential factors of the accident severity based on the ordinal Logit and Probit models [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, 18(3): 836-843.
- [19] WASHINGTON S P, KARLAFTIS M G, MANNERING F L. Statistical and econometric methods for transportation data analysis [M]. 2nd ed. New York: CRC Press, 2010: 333-334.
- [20] ANASTASOPOULOS P C, MANNERING F L. An empirical assessment of fixed and random parameter Logit models using crash- and non-crash-specific injury data [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2011, 43(3): 1140-1147.
- [21] BEHNOOD A, MANNERING F L. An empirical assessment of the effects of economic recessions on pedestrian-injury crashes using mixed and latent-class models [J]. *Analytic Methods in Accident Research*, 2016, 12: 1-17.
- [22] HUANG Y, YAN X D, LI X M, et al. Using a multi-user driving simulator system to explore the patterns of vehicle fleet rear-end collisions occurrence under different foggy conditions and speed limits [J]. *Transportation Research Part F: Psychology and Behaviour*, 2020, 74: 161-172.
- [23] CHANG L, MANNERING F. Analysis of injury severity and vehicle occupancy in truck- and non-truck-involved accidents [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 1999, 31(5): 579-592.
- [24] GIL P A, SANTOS-BERBEL C D, CASTRO M. Driver glare exposure with different vehicle front lighting systems [J]. *Journal of Safety Research*, 2021, 76: 228-237.
- [25] 朱彤, 秦丹, 董傲然, 等. 公交车驾驶人历史违规数据与事故责任的随机参数模型研究 [J]. *安全与环境学报*, 2021, 21(4): 1566-1572.
ZHU T, QIN D, DONG A R, et al. Investigation on the random parameter model of bus driver's history violation data and accident liability [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, 21(4): 1566-1572.

Analysis of electric bicyclist injury severity during traffic peak period with random parameters

ZHU Tong¹, ZHU Zi-shuo¹, ZHANG Jie², XIAO Dan-lei¹, LI Qing¹

(1 School of Transportation Engineer, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2 Centre of Road Traffic Safety Research, Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: This paper proposes a random parameter Logit model to analyze the related factors of electric bicycle injury severity during the peak traffic period. To ascertain and clarify the main influential factors of the electric bicycle crash injury severity and random parameter distribution, a descriptive statistical analysis is used to analyze the features of the driver, the accident-involved vehicle, and the circumstance condition based on the 2142 actual cases. According to the model separation test, this study demonstrates that there is a statistical significance between characteristics of crash injury severity of peak traffic periods and off-peak periods, suggesting that traffic peak period crashes should be modeled separately. Next, based on the actual cases, electric bicyclist injury severity was studied by selecting 25 variables from the driver, vehicle, movement of pre-crash, and road circumstance characteristics as independent variables. Then this study categorized the accident severities into four levels: no injury, minor injury, severe injury, and fatal, as the dependent variables. Importantly, the model is utilized to investigate the heterogeneity of variables by relaxing the limitation of the assumption of "IIA". Thus, this study obtained the discussion of random parameter distribution and relevant discussions. Finally, to quantify the effects of significant factors on the electric bicyclist injury severities, this study investigates the marginal effects. The results manifest that electric bicyclist gender, automobile type, pre-crash automobile movement, and different road environment maintain significant effects on electric bicyclist injury severity during traffic peak periods. Moreover, low visibility is a random parameter obeying normal distribution, highlighting that this indicator's heterogeneous impact on driver injury. Moreover, turning movements of automobiles contribute to reducing the possibility of electric bicyclists suffering severe injury. The results of this study provide the theoretical basis for traffic management strategies related to two-wheelers aiming at traffic peak periods.

Key words: safety social engineering; electric bicycle; traffic accident; injury severity; random parameter model

CLC number: X951 **Document code:** A

Article ID: 1009-6094(2022)01-0271-10

文章编号: 1009-6094(2022)01-0280-12

安全韧性学基本概念和理论体系探讨*

罗通元

(西安石油大学电子工程学院, 西安 710065)

摘要: 为了推动对安全科学的深入研究,以韧性理论为基础开展安全韧性学的新学科建设研究。首先基于管理思想和韧性理论,以系统为研究对象,提出了系统的韧性属性及其内涵。其次提出了安全韧性的基础问题,从安全韧性的内容、内涵和特点3个方面阐述了安全韧性的基本概念,以此为基础,进一步界定了安全韧性学的若干核心概念及其内涵。再次,建立了安全韧性学的定义模型,从7个层面解释了定义的内涵,同时探讨了学科的相关分支。最后,提出了安全韧性学的5个方面的研究内容,阐述了学科研究的一般程序。结果表明,安全韧性学研究具有理论基础和发展前景,能为安全科学基础研究提供新的思路和方法,对安全韧性学的发展具有理论指导作用。

关键词: 安全科学技术基础学科; 韧性; 安全科学; 安全韧性学; 安全韧性模型

中图分类号: X91

文献标志码: A

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2020.0279

0 引言

研究安全科学的基本方法是系统工程理论,预防事故和减轻事故伤害的关键是运用系统工程的管理和技术方法达到系统内部的状态安全,系统的安全状态诸多表征之一是具有稳定可靠的韧性。万事万物都是有韧性的,如果构成系统的要素具有持久的韧性,系统整体就具有对抗扰动(隐患)出现和减轻事故后果的强鲁棒性和良好泛化性。国内外很多学者对韧性理论开展了相关研究,如心理韧性量表、城市韧性理论、应急救援韧性、韧性社会、材料韧性学、经济韧性理论等^[1-6],以及安全学科中的安全生产韧性管理、生产领域韧性应用、系统韧性塑造等^[7-8]。黄浪等^[9]在2016年首次从3个维度构建了系统安全韧性塑造体系的概念模型,深入剖析系统安全韧性塑造体系的作用机理,建立了安全韧性系

* 收稿日期: 2020-09-25

作者简介: 罗通元,讲师,博士,从事安全科学基础理论、安全系统科学研究, 952551556@qq.com。

基金项目: 陕西省教育科学规划课题(SGH20Q225)