

Research on Speed Limit Setting at No-Signal Controlled Road Access

CHEN Qian¹, LIU Jian-jun¹, MEI Bing-song², LAI Jian-ge²

(1. Department of Traffic Management Engineering, Chinese People's Public Security University, Beijing, 102623, China; 2. Traffic Accident Identification Center of Beijing Traffic Management Bureau, Beijing, 100012, China)

Abstract: In order to set reasonable limited speed values at no-signal controlled road access, a method of speed limit setting combined with traffic accident speed identification technique and reliability analysis was put forward. Firstly, the effects of vehicle speed and the setting of speed limit on traffic safety were analyzed. Secondly, the methods of accident speed sample collection were studied, and then accident speed samples' distribution was analyzed. Lastly, the speed limit model was proposed through reliability analysis, and the universality was studied as well. Study result indicates that 264 cases of fatal or injured accidents' speed samples which were collected by traffic accident speed identification technique accord with three-parameter Weibull distribution, and the optimal estimate values of the three parameters are obtained. The speed limit setting model based on reliability analysis has the universality both to different vehicle types and accesses of different grade roads.

Keywords: traffic safety, speed limit setting, reliability analysis, accident speed identification, access, Weibull distribution

无信号控制道路出入口限速值设置研究

陈谦¹, 刘建军¹, 梅冰松², 来剑戈²

(1.中国人民公安大学交通管理工程系, 北京 102623; 2.北京市公安局公安交通管理局交通事故鉴定中心, 北京 100012)

摘要: 为了在无信号控制道路出入口设置合理的限速值, 将交通事故车速鉴定技术和可靠性分析相结合应用到限速值设置中。首先分析车速以及限速值的设置对交通安全的影响, 然后研究无信控道路出入口处事故车速样本的采集方法, 进而分析事故车速样本的分布特征, 最后通过可靠性分析得出限速模型并探讨其普适性。研究结果表明, 应用交通事故车速鉴定技术采集的无信控道路出入口处 264 例死亡、伤入事故的车速样本, 符合三参数 Weibull 分布函数, 通过拟合得到各参数的最优估计值, 基于可靠度的限速值设置模型对于不同车型和不同道路等级的出入口均具有普适性。

关键词: 交通安全, 限速值设置, 可靠性分析, 事故车速鉴定, 道路出入口, 威布尔分布

1 引言

随着机动化增强和经济的发展, 人们对减少出行时间的需求日益增长。速度成为交通参与者选择出行方式和出行路线主要考虑的因素之一, 机动车驾驶人总是希望以高车速换取高运输效率。大多数专家认为, 造成世界上道路死亡最重要的单个成因是不良的速度选择, 在很多国家, 过高和不当的速度是最大的道路安全问题^[1]。在高收入国家, 超速和车速不当造成的交通死亡事故大约占 30%, 在南非商业运营和公共交通工具发生的交通事故中 50%与车速有关^[2]。在我国, 2001 年—2008 年因超速行驶造成的交通事故的起数和死亡人数的统计如表 1 所示^[3], 可见机动车超速行驶是道路交通严重违法行为, 是交通事故发生的主要原因之一。由此可见, 有必要对车速进行科学的管理, 以减少道路交通事故的数量及其产生的人员伤亡和财产损失。

表1 中国2001—2008年因机动车超速行驶造成的交通事故起数和死亡人数

年份	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
事故起数(起)	44878	44311	55515	64474	52655	36586	33487	26966
占交通事故总起数比例	5.94%	5.73%	8.32%	12.45%	11.69%	9.66%	10.23%	10.17%
死亡人数(人)	9242	9672	12107	18410	16015	11828	11478	10584
占交通事故总死亡人数比例	8.72%	8.84%	11.60%	17.19%	16.22%	13.22%	14.06%	14.40%

本文以北京市无信号控制道路出入口为研究对象, 通过对交通事故中机动车进行车速鉴定获取车速样本, 进而探讨基于可靠性分析的限速值设置方法。

2 车速与交通安全的关系

近几年国外的研究成果表明, 速度与事故发生概率间的相关性不强, 但速度与事故严重程度间的关系却很明显^[4], 即速度越高, 事故造成的伤害程度越严重。

世界银行和世界卫生组织在“发展中国家道路交通安全对策”报告中, 用式(1)—(3)表达发展中国家道路平均速度与交通事故数量和伤亡人数之间的关系^[5]:

$$A_1 / A_2 = (V_1 / V_2)^2 \quad (1)$$

$$I_1 / I_2 = (V_1 / V_2)^3 \quad (2)$$

$$F_1 / F_2 = (V_1 / V_2)^4 \quad (3)$$

式中，下标 1 和 2 分别表示状态 1 路段和状态 2 路段； A 、 V 、 I 、 F 分别表示 2 种状态路段的交通事故起数、平均车速、受伤人数和死亡人数。式（1）—（3）表明，交通事故数量、受伤人数、死亡人数与平均车速分别成 2 次方、3 次方、4 次方的关系。交通流平均速度较小范围内增幅，将导致事故数量和伤亡人数，特别是伤亡人数大幅度增加。因而降低交通流平均速度，可有效减少交通事故起数，对更为严重的事故而言效果尤其明显。

Solomon^[6]在 600km 公路上观测 10000 个驾驶员的车速与事故情况，发现车速离散型与事故率的关系可以用 U 形曲线描述，并总结出模型如式（4）所示：

$$I = 10^{0.000602 \Delta v^2 - 0.006675 \Delta v + 2.23} \quad (4)$$

式中 I 为路段事故率（次/10 万车公里）； Δv 为车速与平均车速的差值（km/h）。该模型表明：在交通流中，车速接近平均车速时，发生交通事故率最低；随着车速与平均车速的差增大（离散性增加），无论是大于或者小于平均车速，交通事故数都呈增加趋势。

裴玉龙对中国部分高速公路交通事故分析后认为，车速的标准离差与事故率的关系为指数关系^[7]，如式（5）所示，

$$AR = 9.5839e^{0.0553\sigma} \quad (5)$$

式中 AR 为亿车公里事故率（次/亿车公里）， σ 为车速标准离差（km/h），事故率随着车速标准离差的增大而指数增长，即车速分布越分散，事故率越高，这与国外的研究结果是一致的。这为车速管理提供了有理的依据：对车辆进行高速和低速进行限制，并且使二者与平均车速的差值尽可能小，降低车速分布的离散性，从而减少事故的发生率。

车速与事故严重程度的关系是基于物理学的。人体组织在碰撞时所承受的冲击力与质量和速度有关，要吸收的动能是其质量与速度平方乘积的一半，说明当速度增加时，它的作用显著增强。对人体的损害程度也取决于碰撞表面或物体的形状和刚度，但速度通常起到至关重要的作用^[8]。通常，对于行人和乘员的人身伤害程度用头部伤害指数 HIC、胸部加速度、胫骨加速度等来描述。乔维高对 HIC 与车辆碰撞速度的关系进行研究，认为人员伤害与车辆碰撞的速度变化成正比^[9]。

3 限速管理对交通安全的影响

理论上可以通过速度管理，来减少车速离散差和设置速度上限，达到减少事故率和降低伤害程度的目的。表 2 总结了部分国家在实践中对限速值设置收效方面的研究成果^[10]。

表2 降低或提高限速值对交通流速度影响

限速值增减情况	国家	限速值变化	对交通流速度和事故的影响	限速值增减情况	国家	限速值变化	对交通流速度和事故的影响
降低	英国	100km/h 降低到 80km/h	交通流速度下降 4km/h，交通事故下降 14%	增加	美国（40 个州）	89km/h 增加到 105km/h	事故死亡人数增加 15%，有 12 个州下降或无明显变化
	澳大利亚	110km/h 降到 100km/h	伤害交通事故下降 19%		澳大利亚	100km/h 增加到 110km/h	伤害交通事故增加 25%
	瑞士	130km/h 降到 120km/h	交通流速度下降 5km/h，死亡事故下降 12%		美国（爱荷华州）	89km/h 增加到 105km/h	死亡事故增加 36%
	澳大利亚	下降 5—20km/h	事故数增加 4%		澳大利亚	提高 5—20km/h	总体上事故增加 8%，但在限速值由 60km/h 提高到 80km/h 区域事故减少 35%

由表 2 可知，交通事故发生概率和事故严重程度通常会随着限速值的降低而减少，随着限速值的增加而增加；限速区域和限速值的不同，会影响最终的效果。

4 基于车速鉴定技术和可靠性分析的无信号控制道路出入口限速值设置研究

目前我国关于限速的研究不够深入和系统,研究多集中于如何对高速公路和城市快速路进行限速,等级公路的限速关注不够;多集中于对路段限速的研究,并没有对路口等事故黑点进行特殊考虑,导致在实践中往往将路口的限速值“等同于”路段限速值,一般由小汽车在自由流状态下通过路段定点的85%位车速确定,也就是只有15%的车辆速度高于限速值,在安全性和机动性之间偏向后者,可能使得车辆以较高的速度进入路口,从而导致发生事故的增大。目前我国道路限速的设置主要依据《道路交通安全法》及其实施条例中规定的限速标准,省级立法机构对全国性法律没有规范到的道路上行驶的车辆规定了具体的机动车行驶速度标准。但是,理论研究的不足造成法律法规的不全面且缺乏科学依据。本节探讨基于交通事故鉴定技术和可靠性分析的限速值设置的问题。

4.1 限速区域

道路出入口是道路网的重要节点,既指各种道路交叉口(三枝、四枝、多枝、环形交叉口等),也包括低等级道路与高等级道路的衔接处、中央分隔带开口、高速公路出入口、城市快速路出入口、生活区或单位与道路的连接道(driveway)出入口等,它们的构造、交通组织方式相似,不同方向的交通流之间形成交织、合流和分流,尤其导致非信号控制条件下交通冲突增多,这些均为道路出入口不同于道路路段的特点。道路出入口的安全性较低,容易成为道路网中的事故黑点。据统计,2004年至2008年,北京市发生在道路出入口处的交通事故起数占当年交通事故总数的25%—31%,死亡人数占交通事故总死亡人数的22%—26%,同时,交通事故使道路出入口的通行能力大大降低。

笔者认为,在道路出入口处,在安全性和机动性之间应当以“安全为本”,设置合理安全的限速值,最大限度的保障交通参与者的人身财产安全,方能体现科学发展观“以人为本”的核心。《道路交通安全法》第四十四条规定“机动车通过交叉路口,应当按照交通信号灯、交通标志、交通标线或者交通警察的指挥通过;通过没有交通信号灯、交通标志、交通标线或者交通警察指挥的交叉路口时,应当减速慢行,并让行人和优先通行的车辆先行”,这也体现了“安全为本”的原则。

但是,我国现行法律、法规中并没有规定交叉路口确切的限速值,使得在公安交通管理实践中,在道路出入口发生事故后,事故车辆制动前车速如果低于路段的限速值,只能笼统以“违背安全驾驶的原则”定责,导致忽视了车速对事故的影响。因此本文选择北京市的非信号控制道路出入口限速值设置为研究对象,其限速区域应结合国家标准GB5768-1999《道路交通标志标线》中相关内容,自离各入口最近的警告标志或指路标志算起,都属于道路出入口的范围。

4.2 交通事故车速鉴定技术

交通事故车速鉴定是指具备资格的鉴定机构受公安机关交通管理部门委托后,根据事故现场路面痕迹、车体变形、人体损伤等情况,运用专门知识和手段,推算事故车辆在事故发生前和事故过程中的速度及其变化。本文利用交通事故鉴定技术获取道路出入口事故车速样本。据统计,北京市发生在道路出入口处的交通事故中93%为机动车碰撞事故(指正面碰撞、侧面碰撞和追尾碰撞)。目前,在事故处理实践中对机动车碰撞事故的车速鉴定,除了利用视频图像动态时序分析以及借助雷达测速仪、车辆行驶记录仪等硬件设施,较为成熟的车速鉴定技术是借助力学原理对事故现场的轮胎印迹、车辆撞击痕迹等进行分析进而推算出事故车速。图1—图3为三种典型碰撞事故的车速鉴定流程图。

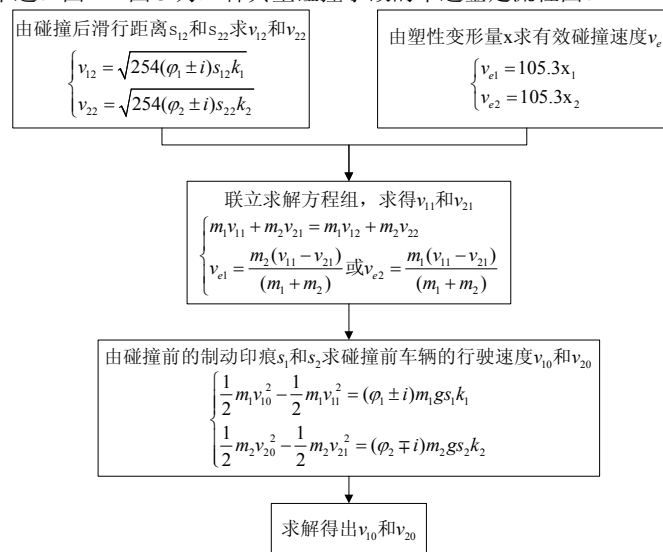


图1 正面碰撞事故车速鉴定流程图

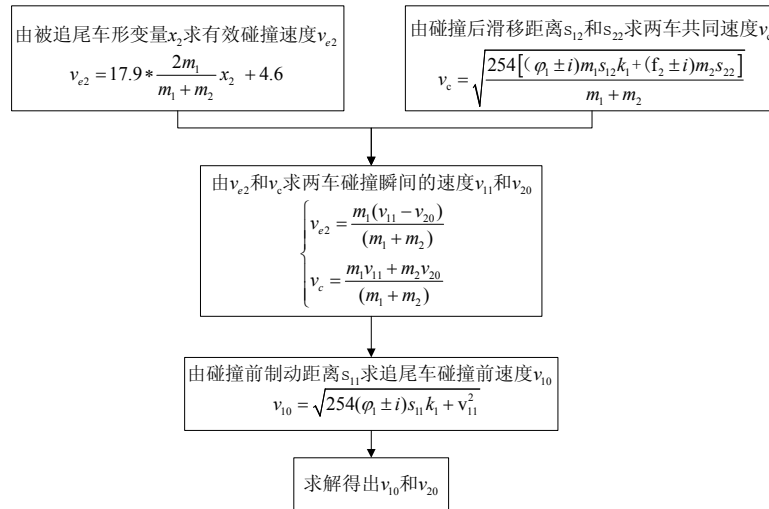


图2 追尾碰撞事故车速鉴定流程图

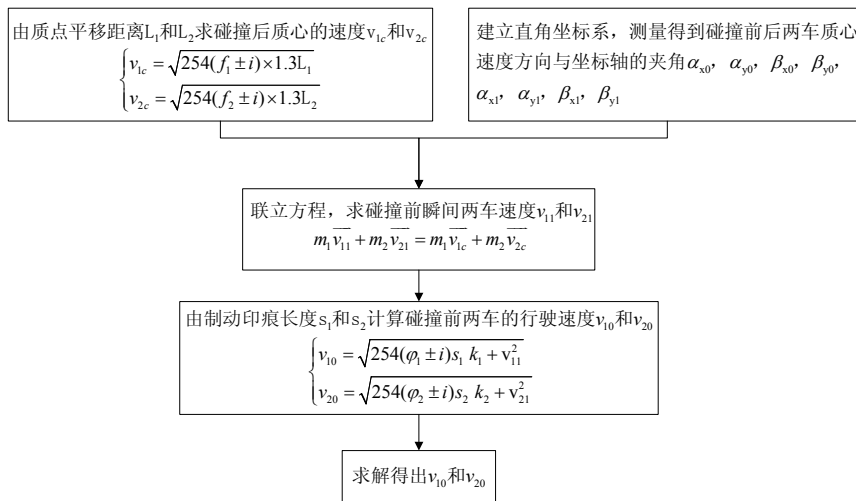


图3 侧面碰撞事故车速鉴定流程图

图中, φ_1 和 φ_2 为车辆与地面的附着系数, i 为事故地点的坡度, s_1 和 s_2 为碰撞前车辆的制动距离, k_1 和 k_2 为附着系数的修正系数, m_1 和 m_2 分别为两车的总质量, v_{10} 和 v_{20} 分别为碰撞前两车的行驶速度, v_{11} 和 v_{21} 分别为驾驶人发现危险采取制动措施至车辆碰撞前瞬间的速度, v_{e1} 和 v_{e2} 分别为碰撞变形阶段速度的变化。

当事故过程较为复杂, 特别是涉及机动车与行人之间的碰撞, 手工推算事故车速较为繁琐时, 还可以利用 PC-CRASH 仿真软件辅助进行车速鉴定。首先输入车辆参数、摩擦系数、恢复系数等参数, 然后以车辆停止位置或制动印迹为优化变量, 可以将车辆通过的中间位置作为约束条件, 通过反复迭代计算, 不断修改输入的速度、角度的初始值, 以及摩擦系数、恢复系数、碰撞中心位置、接触面角度等参数, 直至优化目标与真实事故情况基本吻合, 从而可以认为该状态下的车辆运动初始状态参数与真实事故情况是接近的, 此时的车速即为事故车速鉴定结论。

4.3 无信控道路出入口事故车速分布特征

大量的统计研究显示, 车速的分布指标与交通事故之间存在着相关性。目前, 国内外限速值设置方法多基于对特定路段断面车速分布特征的统计分析, 主要是考虑满足道路线形的要求, 而对道路出入口处的车速分布特征的研究鲜有成果, 致使道路出入口的限速设置缺乏数据支持。

4.3.1 事故车速样本采集

发生在道路出入口处的事故中, 车速因驾驶人自身差异、车辆性能高低、道路条件、周围环境等因素的影响, 表现出很大的不确定性和随机性。统计学原理表明, 经过大量的统计, 随机现象会呈现一定的规律性。通过研究车速的该规律性, 可

以了解道路出入口事故车速的各项特征。

利用交通事故车速鉴定技术,对北京近年来发生在道路出入口处的交通事故的有关机动车进行速度鉴定,获取速度样本,研究其分布特征,显然这与交通事故之间的相关性更强,由此研究设置限速值的方法更加符合“安全为本”的原则。根据我国 1998 年版的《交通工程手册》,本文选取道路出入口事故中机动车的车速鉴定值样本容量为 264,满足统计学上的要求。

4.3.2 事故车速数据分析

对事故车速样本从小到大进行排序,并绘制车速频率分布直方图和累计频率分布图如图 5、图 6 所示:

由图可知,道路出入口处的事故车速分布呈现出非对称性以及多峰性,而常见的正态分布和 Logistic 分布具有对称性,适用性较差。事实上,Weibull 分布模型在描述连续型分布方面更具普适性,目前在可靠性理论中应用较为广泛,不少电子与机械产品寿命都可以用 weibull 分布来描述,而在道路交通事故相关文献中尚无应用。

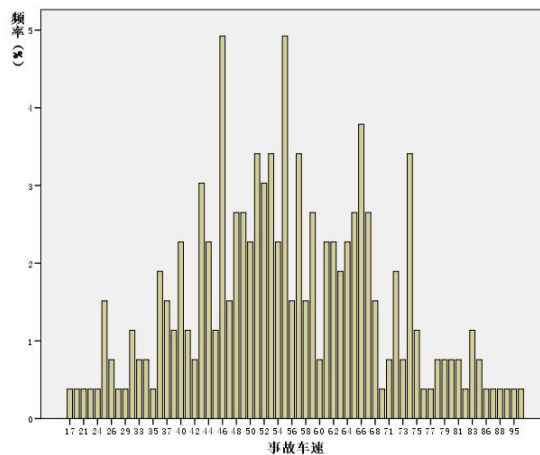


图 5 无信号控制道路出入口事故车速频率分布直方图

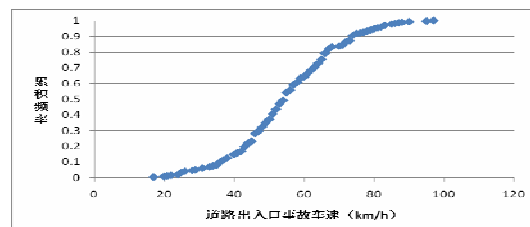


图 6 无信号控制道路出入口事故车速累积频率分布图

4.3.3 Weibull 分布假设检验

P-P 概率图是根据变量的累积频率对应于所指定的理论分布累积频率绘制的散点图,它可以直观的检测样本数据是否与某个概率分布的统计图形一致。如果被检验的数据符合所指定的分布,代表样本数据的点应当呈对角线分布。

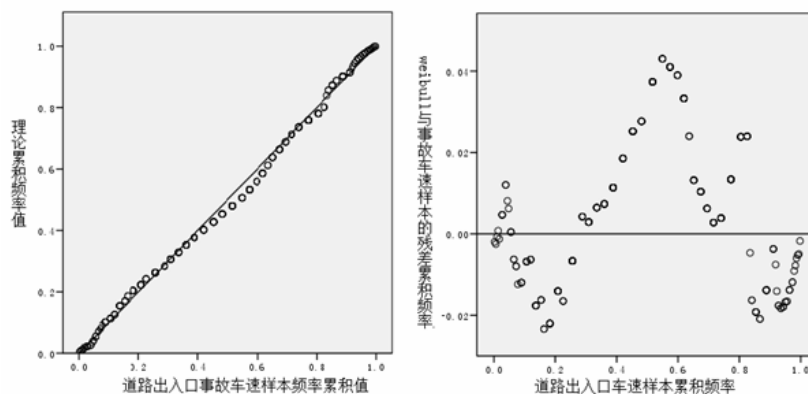


图 7 无信号控制道路出入口事故车速 Weibull 分布 P-P 散点图和去势概率图

对道路出入口事故车速进行 Weibull 分布检验, 生成的 P-P 散点图见图 7。结果表明, Weibull P-P 图的散点近似呈一条直线, 而无趋势 Weibull P-P 图的散点均匀分布在纵坐标为 0 的直线上下, 理论值与实际值的残差绝对值都在 0.04 以内, 故样本的 Weibull 分布性还是令人满意的。

拟合优度是样本分布与先验的或拟合观测值的理论分布之间符合程度的度量。Weibull 分布认为道路出入口事故车速的概率分布函数为^[11]:

$$F(v \leq \tau) = 1 - e^{-\left(\frac{\tau - \gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (6)$$

$$(0 \leq \gamma \leq \tau, \beta > 0, \eta > 0)$$

式中, τ 为事故车速 (km/h); γ 为概率分布的位置参数; β 为概率分布的形状参数; η 为概率分布的尺度参数。用 Matlab 进行非线性回归, 经过迭代后得到 Weibull 分布参数值的最优解, 见表 3。考虑这里是非线性回归, 采用方差分析对模型进行显著性检验, 决定系数 R^2 为 0.9987, 拟合优度达到非常令人满意的程度。最终得到的 Weibull 分布曲线如图 8 所示, 可以很直观的看到拟合效果非常好。

表3 无信控道路出入口事故车速Weibull分布参数最优估计值

参数	最优估计值	95%置信区间
γ	15.21	(11.4, 19.03)
$1/\eta$	1.052e-005	(-4.28e-006, 2.531e-005)
β	3.02	(2.72, 3.323)

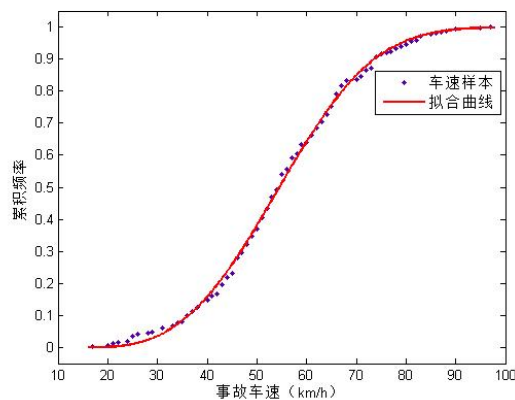


图8 无信号控制道路出入口事故车速 Weibull 分布曲线图

由此可得, 道路出入口事故车速的 Weibull 概率分布函数和概率密度函数分别为:

$$F(v \leq \tau) = 1 - e^{-0.00001052 * (\tau - 15.21)^{3.022}} \quad (7)$$

$$f(v) = \frac{\beta}{\eta} (v - \gamma)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{v - \gamma}{\eta}\right)^\beta} = 0.00003179 * (v - 15.21)^{2.022} e^{-0.00001052 * (v - 15.21)^{3.022}} \quad (8)$$

4.4 基于可靠性分析的无信控道路出入口限速值计算模型

可靠性是指元件、设备或系统, 在规定的条件和规定的时间范围内完成其规定功能的概率^[11]。车速管理在某种程度上也是一种可靠性管理, 通过设置限速值等方式使得车辆在特定的时空条件下无事故的通行, 完成其交通运输功能。衡量产品或系统的可靠性水平最为常用的指标为可靠度和故障率。下面对道路出入口这两个指标进行分析。

道路出入口的可靠度 R 是指车辆在特定的时空条件下安全通过路口的概率, 由上文的分析可知, R 是关于速度的函数, 当车辆通过道路出入口的速度值为 v 时的可靠度为 $R(v) = P(V > v)$, 不可靠度为 $F(v) = P(V \leq v)$, 显然 $R(v) + F(v) = 1$ 。由定义可知, 不可靠度 $F(v)$ 的含义为车辆以速度 v 在特定时空条件下没有安全通过路口, 即发生交通事故的概率, 此时的车速分布函数即为式 (7), 因此有:

$$R(v) = 1 - F(v) = e^{-\left(\frac{v - \gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (9)$$

代入三个参数值得,

$$R(v) = e^{(-0.00001052 * (v-15.21)^{2.022})} \quad (10)$$

道路出入口故障率(事故率) $\lambda(v)$ 是指车辆速度达到 v 后,当车速变化为 Δv 时发生事故的概率。当 Δv 趋近于 0 时,临界事故率定义为 $h(v)$,则有:

$$h(v) = \frac{f(v)}{R(v)} = 0.00003179 * (v - 15.21)^{2.022} \quad (11)$$

由此推得不同可靠度下限速值的计算模型如式(12)所示,

$$v = \left(-\frac{\ln R(v)}{0.00001052} \right)^{0.3309} + 15.21 \quad (12)$$

考虑到确保安全的原则,建议在道路出入口处车速可靠度取 0.85,代入式(12)解得此时车速为 39.54km/h,即机动车以小于等于 39.54km/h 的速度安全通过道路出入口的概率为 85%。因此无信号控制道路出入口的限速值定为 40km/h 时,可以保证 85%的车辆不发生交通事故。实践中,可以根据不同的可靠度得到相应的事故车速,进而作为限速值设置时的参考。

4.5 关于分车型限速及不同等级道路出入口限速普适性探讨

参考《北京市实施<中华人民共和国道路交通安全法>办法》(以下简称《办法》)第 39 条中有关限速的规定,本文将事故车速样本所对应的事故车辆(机动车)按性能高低分为快速车、中速车、慢速车三类,其中慢速车包括“低速载货汽车、三轮汽车、拖拉机、电瓶车、轮式专用机械车、正三轮摩托车、轻便摩托车”,中速车包括“附载作业人员的货运汽车、全挂拖斗车、运载危险化学品的货运汽车、二轮摩托车、侧三轮摩托车和铰接式客车、电车”,其他未提及机动车归为快速车,分别标号为 1、2、3。对车型变量(定类变量)和事故车速变量(定距变量)利用 Eta 系数进行相关性检验,以车型为控制变量、事故车速为观测变量时,分析结果为 $\text{Eta}=0.161$,说明车型和事故车速之间的相关关系很弱。也就是说,机动车在道路出入口发生事故时其车速受车型影响很小。

《道路交通安全法实施条例》第 45 条和《办法》第 39 条分别规定了不同车辆在不同道路条件下的限速值,从另一角度来说,法律规定的限速值可以作为特定道路条件的表征值,如表 4 所示:

表 4 法定限速值及其表征的交通条件

法定限速值(km/h)	表征交通条件	法定限速值(km/h)	表征交通条件
30	无道路中心线的城市道路;急弯路、窄路、窄桥;掉头、下陡坡;冰雪、泥泞的道路;低速车在道路上	60	中速车在封闭的机动车专用道路和公路上;
40	无道路中心线的公路	70	同方向 1 条机动车道的公路;同方向 2 条以上机动车道的城市道路
50	同方向只有 1 条机动车道的城市道路;中速车在城市道路上	80	同方向 2 条以上机动车道的封闭的机动车专用道路和公路

对事故发生地点的路段法定限速值(现行道路出入口的限速值大多使用路段限速值)和事故车速进行相关性检验,路段法定限速值为控制变量、事故车速为观测变量时, $\text{Eta}=0.309$,说明路段限速值和事故车速之间相关性较弱,也说明在道路出入口发生事故的车速受不同交通条件(道路、车型)的影响不大。

基于以上分析,可以得出结论,无信号控制道路出入口的限速值设置受车型、道路条件的影响很小,因此可以对样本采集区域(北京市)的道路出入口设置相同的限速值。

5 结论

基于交通事故车速鉴定技术和可靠性分析,通过对北京市无信号控制道路出入口事故车速分布特征的研究,得出以下主要结论:

1) 道路出入口处作为事故黑点,事故形态多为碰撞事故,包括正面碰撞、追尾碰撞、侧面碰撞。根据地面轮胎印迹以及车辆碰撞痕迹等可以推算事故发生前车辆的行驶速度,并给出计算流程。

- 2) 无信号控制道路出入口处的事故车速符合 Weibull 分布, 通过拟合得出三个参数的最优估计值, 得出事故车速概率分布函数和概率密度函数的表达式。
- 3) 建立基于可靠度的限速值计算模型, 建议以可靠度为 0.85 时的事故车速 40km/h 为限速值。
- 4) 通过相关性检验, 得出不同车型以及不同交通条件对无信控道路出入口事故车速的影响较小, 因此该限速模型具有普适性。

参考文献

- [43] OECD/ECMT Transport Research Centre: Speed Management report, Paris 2006(available in English and French).
- [44] World Health Organization. World report on road traffic injury prevention[R].Geneva: World Health Organization, 2004.
- [45] 公安部交通管理局.中华人民共和国道路交通事故统计年报[R].北京: 公安部交通管理局, 2001-2009.
- [46] Transportation Research Board. Special Report 254: Managing Speed- Review of Current Practice for Setting and Enforcing Speed Limits [M].Washington, DC: Transportation Research Board, 1998.
- [47] 刘志强, 王兆华, 钱卫东.基于速度的交通事故分析[J].中国安全科学学报, 2005, 15(11): 35 – 38.
- [48] D.Solomon, Accidents on Main Rural Highways Related to Speed, Driver and Vehicle[R], Washington, D.C: Federal Highway Administration, 1964.
- [49] 裴玉龙, 程国柱.高速公路车速离散型与交通事故的关系及车速管理研究[J].中国公路学报, 2004, 17 (1): 74 – 78.
- [50] Christoffel T,Gallagher S. Injury Prevention and Public Health: Practical Knowledge, skills, and Strategies, 2nd edition,2006.
- [51] 乔维高, 朱西产, 王仲范.车辆碰撞速度对行人伤害的影响分析及仿真[J].武汉理工大学学报, 2005, 27 (12): 96 – 98.
- [52] 马兆友, 黎刚, 李平凡.关于速度及速度限制的交通安全分析[J].交通运输系统工程与信息, 2007, 7 (3): 130 – 133.
- [53] 曾天翔, 丁连芬译.可靠性设计手册[M].北京: 航空工业出版社, 1987.