

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2022.12.023

高速公路连续下坡路段货车追尾风险评价研究

邹海云¹, 刘 锴², 张 驰², 马如鹏³, 王 博²

(1. 四川乐西高速公路有限责任公司, 四川 成都 610000;

2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064;

3. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410200)

摘要: 为了提高高速公路连续下坡路段货车行车安全性, 优化交通安全管理或交安设施的设计, 深入研究高速公路连续下坡路段货车追尾事故风险, 基于实测数据提出了考虑车速差与车头时距的追尾风险评价指标——碰撞减速率(*CDR*)。首先, 分析长大下坡路段货车追尾事故风险原理, 利用西部某高速公路特管区长下坡路段的货车行车数据, 确定风险影响因素为车速差与车头时距。然后, 通过拟合分布检验, 分析计算得到有效 *CDR* 数据的分布规律, 并以其分布的85%分位值作为危险 *CDR* 阈值。最后, 结合碰撞潜在指数(*CPI*)概念建立基于 *CDR* 的连续下坡货车追尾风险概率模型。以高速公路特管区追尾事故数据为基础, 对基于 *CDR* 的连续下坡货车追尾风险概率模型进行应用与检验。结果表明: 拟合分布检验中, 所研究连续下坡路段的 *CDR* 样本服从对数正态分布, 危险 *CDR* 的阈值为 0.4916 m/s^2 ; 在不同测点处的追尾概率风险有较为显著的差异, 而不同时间段的追尾风险无明显差异; 经验证, 事故率数据与概率风险数据相关系数为94.5%, 为强相关, 即事故率数据与概率风险数据的变化趋势一致性较强, 表明基于 *CDR* 的追尾事故风险概率模型可为高速公路连续下坡路段的风险研究提供科学评估依据。

关键词: 交通安全; 货车追尾风险; 风险概率模型; 连续下坡; 碰撞减速率

中图分类号: X951

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2022) 12-0188-08

Study on Risk Evaluation of Truck Rear-end Collision in Continuous Downhill Section of Expressway

ZOU Hai-yun¹, LIU Kai², ZHANG Chi², MA Ru-peng³, WANG Bo²

(1. Sichuan Leshan-Xichang Expressway Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610000, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China;

3. Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Changsha Hunan 410200, China)

Abstract: In order to improve the safety of truck traffic on continuous downhill sections of expressways, optimise traffic safety management or the design of traffic safety facilities, in-depth study the risk of rear-end collision accidents of trucks on continuous downhill sections of expressways, based on actual measurement data, the evaluation indicator of rear-end collision risk considering the speed difference and headway, Collision Deceleration Rate (*CDR*), is put forward. First, the principle of risk of rear-end collision accidents of trucks on long downhill road sections is analysed, and the risk influencing factors are determined as speed difference and headway by using the data of truck travelling on long downhill road sections in a special control area of a western expressway. Then, the distribution of effective *CDR* data is analysed and calculated through fitting distribution test, and the 85% quantile value of its distribution is taken as the threshold value of dangerous *CDR*. Finally, a *CDR*-based continuous downhill truck rear-end collision risk probability model is

收稿日期: 2022-05-31

基金项目: 四川省交通运输厅科技项目 (2021-ZL-15); 四川省科技计划资助项目 (2022YFG0048)

作者简介: 邹海云 (1977-), 男, 四川邻水人, 高级工程师. (121399257@qq.com)

established combining with the concept of collision potential index (*CPI*). Based on the data of rear-end collision accident in the special control area of expressway, the *CDR*-based continuous downhill truck rear-end collision risk probability model is applied and tested. The result shows that (1) in the fitting distribution test, the *CDR* samples of the studied continuous downhill section obey lognormal distribution, the threshold value of hazardous *CDR* is 0.4916 m/s^2 ; (2) there is a significant difference in the probability risk of rear-end collision at different measuring points, but there is no significant difference in the risk of rear-end collision in different time periods; (3) it is verified that the correlation coefficient between the accident rate data and the probability risk data is 94.5%, which is a strong correlation, that is, the change trends of the accident rate data and the probability risk data is consistent, indicating that the *CDR*-based rear-end collision accident risk probability model can provide a scientific evaluation basis for the risk research on continuous downhill sections of expressways.

Key words: Road engineering; Truck rear-end collision risk; risk probability model; continuous downhill; Collision Deceleration Rate (*CDR*)

0 引言

近年来, 中国提出并实行了“交通强国”战略, 在中国西南、西北地区大力建设高速公路, 以适应国家经济发展的需要, 但由于中国西部地区的地形与地质特点, 高速公路需在较短距离上克服较大高差时, 往往只能选择采用较低的设计指标, 使得高速公路出现较多连续下坡路段。据相关统计调查^[1-2], 我国高速公路连续下坡路段事故频发, 在事故形态中, 追尾碰撞事故占有较高的比例, 同时, 其后果也最为严重。而连续下坡路段对大型货车的行车安全较不利, 更易导致追尾事故的发生, 故而提高高速公路连续下坡路段货车行驶的安全性, 降低其追尾事故风险, 减少我国交通事故损失与伤亡的需求是急迫的。

对于车辆追尾事故机理及其风险模型的研究方面, 可以归纳为 4 类: (1) 对基于风险影响因素的分析: 2017 年, 丁乃侃等^[3]首次定义并界定直接和间接的追尾风险感知, 并以结构方程模型探索多因素与风险的关系。2016 年, 刘鑫鑫^[4]利用实测追尾事故数据, 分别构建了追尾事故严重程度概率预测模型和追尾事故严重程度预测模型。2007 年, 赵杨东^[5]在追尾事故的特点分析和类别界定基础上, 引入高速公路追尾事故危险度的概念, 提出了高速公路尾随事故和撞静止车辆危险度计算模型。2019 年, Junjie Zhang 等^[6]探讨了驾驶行为异质性的对追尾碰撞的影响, 设计了模拟试验来评估跟车行为的异质性对追尾事故风险的影响。(2) 基于速度理论的追尾风险评价模型: 2011 年, 陆斯文等^[7]分析了高速公路追尾事故的机理特征, 以后随车辆减速度临界值

作为风险评价指标, 计算得出了用追尾概率和能量损失来表征的追尾事故风险。(3) 从空间角度建立追尾风险模型: 2010 年, 史海燕^[8]建立了安全车距的计算模型, 分析了各种因素对车辆发生追尾事故的影响。2009 年, 刘晓阳^[9]探讨了追尾碰撞事故机理和诱发因素及其相关性, 推导出了安全车距的计算模型, 在此基础上建立各因素对车辆发生追尾概率的关系。(4) 从时间角度来研究追尾风险: 2021 年, 袁守利^[10]考虑影响驾驶员反应时间的不同因素, 建立了分等级的碰撞预警模型。2001 年, Michiel M. Minderhoud 等^[11]将碰撞时间 TTC (Time-to-collision, TTC) 概念引入道路交通安全分析, 介绍了两个新的安全指标来计算总体安全指标值。2018 年, 王佳丽^[12]选取 TTC 作为风险替代指标, 建立了大雾天气下的追尾事故风险传播模型。该方面的研究从多个角度切入, 为高速公路连续下坡货车追尾风险的研究提供了众多可以借鉴的模型。

总而言之, 高速公路追尾事故及风险研究中, 主要从影响因素、速度、空间、时间 4 个角度中提取得到指标, 再结合道路上车辆行车的不确定性, 进一步得到汽车追尾事故风险模型。总结以上两方面研究可以发现, 现有的汽车追尾事故风险研究中缺乏针对连续下坡货车追尾风险的研究。为此, 本研究提出以 *CDR* (碰撞减速率) 作为车辆追尾风险指标, 建立一种基于实测车头时距与速度数据的连续下坡路段货车追尾概率风险模型, 希望针对性地对连续下坡路段货车的追尾事故风险做出分析, 有益于山区高速公路追尾事故风险的研究。

1 连续下坡路段货车追尾事故风险分析

当货车载重行驶于长大下坡时,由于长时间的下坡行驶,速度有不断增大的趋势,为了保证安全,驾驶员不得不频繁采取制动措施以限制车速,此种状态持续时间较长的话,将会使车辆制动性能明显下降,最终可能导致刹车失灵而引发车辆失控,载重货车惯性较大,难以进行方向控制,随着失控后速度的增加,会导致载重货车无法与正常行驶的前车保持安全的行车距离,最终发生追尾事故。而追尾事故可按参与车辆的多少及其车辆类型进行分类,本研究针对大型车辆两车追尾事故进行研究,对于大型车辆的多车碰撞,由于其过程与致因复杂多样,本研究暂不做研究。

西部某高速公路交通特管区位于平均纵坡大于3%的36 km长下坡范围,有追尾事故多发、货车车型比例较高的特点,且该特管区内实行严格的分车道分车型限速措施,管内路段实行客、货车分道行驶,左侧为客车道(限速60~80 km/h),右侧为货车道(限速60~70 km/h),使得后车无法实行超车行为,只能在单一车道上保持跟随前车行驶的状态,此时后车处于一种非自由行驶状态。有研究表明^[13],当车头时距较大时,由于两车距离较远,前导车驾驶行为不对后随车辆的行驶产生影响,此时车辆处于自由驾驶状态,而非跟驰状态,车辆发生追尾事故的可能性小并且与速度和车头时距的相关性不强。对于车辆跟驰状态的判断目前研究的结论不一,部分研究得出的结论是当车头时距小于或等于5 s时车辆处于跟驰状态^[14];而在进一步的研究中发现^[15],车头时距小于1.6 s时,车辆处于强跟驰状态,车头时距1.6~2.6 s属于状态过度区间,当车头时距大于2.6 s之间时,车辆处于弱跟驰状态,如图1所示。

从安全角度考虑,当车辆在单一车道上排队行驶时,后随车辆只能在该车道上保持跟随前车行驶的状态,无法实行超车行为,使得跟驰车辆的安全运行与其车速和车距关联性较大,当车辆的车速条件与车距条件均被破坏时,前后车辆车速较大,车距较近,有较大发生追尾事故的可能性。而高速公路各路段上,行驶车辆的速度与间距往往具有复杂性与不确定性,其影响着不利事件——追尾事故发生可能性的大小,这符合风险问题的研究特点^[16],可以用通过风险分析来进行研究。

本研究研究连续下坡路段货车的追尾事故风险,

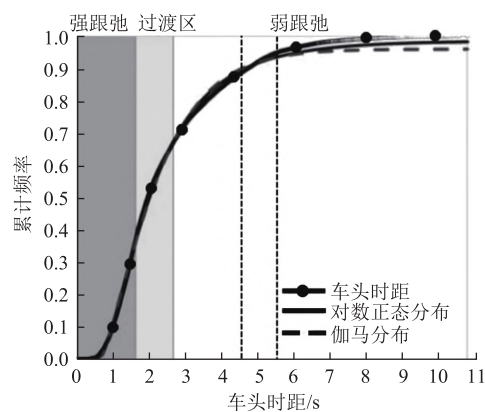


图1 车头时距分布函数

Fig. 1 Distribution function of headway

结合风险分析的基本原理,将此风险定义为在连续下坡路段发生两车追尾事故的可能性大小;结合安全跟车行驶的速度条件及间距条件的研究,确定以两车的速度以及后随车的车头时距作为风险影响因素,通过对两个风险影响因素分析、处理及组合,研究其不确定性,进行具体情景(连续下坡路段货车追尾事故)、不确定意义下风险的量化分析。

2 数据准备和处理

试验地点选择西部某高速公路的交通特管区,其主要原因有两点:(1)该特管区位于平均纵坡为2.96%的长下坡(该全长51 km)范围内,特管区路段全长36 km,由于连续下坡距离较长且平均纵坡较大,且位于山区,行车环境较为复杂,事故发生频繁,属于追尾事故的易发路段,与本研究的事故类型相契合。(2)受所在的高速公路交通功能影响,该特管区路段下行方向的各年货车车型占比均在40%~60%,且研究路段通车时间长(2012年通车),在该特管区所处的长下坡所发生的事故中,其中货车交通事故占总事故数38.58%(2012年4月—2017年8月),这为大量采集货车的过车及事故样本数据提供了便利。

2.1 数据来源

2.1.1 高清卡口系统

高清卡口系统运用视频检测方式,通过抓拍高清图片来识别车辆行驶轨迹,并对车辆行驶轨迹进行记录,保存在服务器数据库中;然后在视频中通过照片的形式显示车辆的通过时间、行驶速度、行驶方向、车牌号码、地点等信息,为道路安全管理方法的研究与实施提供支持^[17]。

2.1.2 测点信息

据不完全事故信息统计,2013—2018年西部某

高速公路 36 km 长下坡范围内, 在事故多发点安装了 4 处高清卡口系统, 4 处高清卡口附近的百万车公里事故率为 0.775 5 次/(百万车·km), 而长下坡全范围内的百万车公里事故率为 0.359 4 次/(百万车·km), 前者百万车公里事故率为后者的两倍以上, 可见该公路交通特管区范围为该处连续下坡事故多发路段。

采用的数据为 2020 年 2 月 23 日—2020 年 3 月 22 日期间该交通特管区内 4 处高清卡口的过车数据 (共 78 219 组), 测点桩号分别为 K2084, K2088,

K2110, K2114, 具体布置信息见表 1, 过车数据的时间及空间分布情况见图 2。

表 1 高清卡口测点位置信息

Tab. 1 Position information of high-definition bayonet measuring points

测点桩号	纵坡/%	平面线形	距顶坡距离/km
K2084	-2.8	R347-R ∞	35
K2088	-2.8	R560-R620-R ∞	31
K2110	-3.995	R650-R ∞	9
K2114	-4.003	R420-R460-R87	5

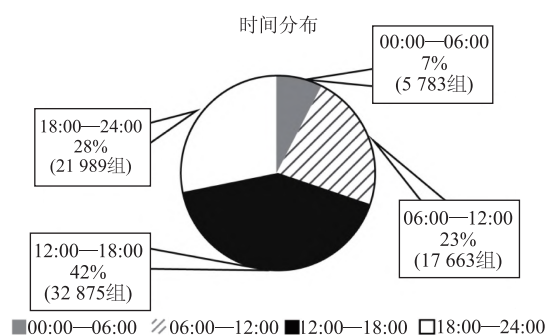


图 2 测点过车数据的时间及空间分布

Fig. 2 Time and space distributions of data of vehicle passing at measuring points

2.2 数据分析与风险指标描述

2.2.1 数据分析

本研究通过 4 个高清卡口测点的过车数据, 共收集了 78 219 组包括货车速度、经过时间、车牌号及车辆类型等信息的有效数据, 过车数据的具体时空分布情况如图 3 所示。

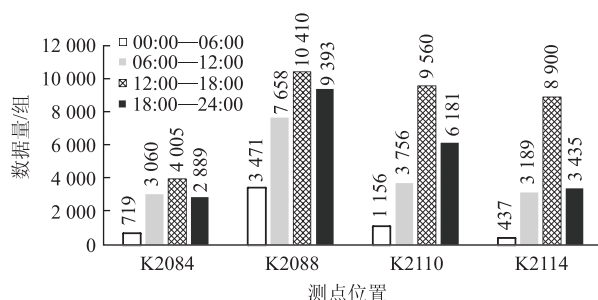


图 3 过车数据的具体时空分布情况

Fig. 3 Specific spatiotemporal distribution of vehicle passing data

本研究对由南向北下坡路段大货车的速度以及通过时间进行了分析处理, 结合特管区连续下坡车辆追尾风险分析, 考虑其速度破坏条件及间距条件, 选取大货车的速度及车头时距作为追尾风险的影响因素, 并对其进行了筛选, 过程如下:

由于该交通特管区实行严格的分车道分车型行

车管理措施, 货车驾驶员们普遍采取了较慢的行驶速度, 在对速度数据进行分析之后发现, 4 个测点的总体速度分布情况较为一致, 各个时间段的分布情况变化不大, 速度处于 40~70 km/h 的速度数据的平均占比为 96.47%。而对于车头时距数据, 当车头时距较大时, 由于两车距离较远, 后随车辆处于自由驾驶状态, 而非跟驰状态, 车辆发生追尾事故的可能性小并且与速度和车头时距的相关性不强。对于车辆跟驰状态的判断目前研究的结论不一, 部分研究得出的结论是当车头时距小于或等于 5 s 时车辆处于跟驰状态^[14]。综上所述, 本研究对处理所得数据的筛选条件为: (1) 车辆速度在 40~70 km/h 之间; (2) 车头时距小于或等于 5 s。并以筛选出的车辆速度及车头时距数据为基础进行连续下坡货车追尾概率风险指标的定义及模型的建立。

2.2.2 风险指标描述

结合上述追尾事故风险分析, 通过分析及筛选得到的速度以及车头时距数据及每辆车经过测点时的行驶车速, 定义风险分析指标——碰撞减速率 CDR (Collision Deceleration Rate, CDR)。

CDR 表示了前后车辆在一个车头时距的时间间隔内 (假设一车做匀速运动, 另一车做匀变速运

动), 后车加速 (或前车减速) 使两车达到相等速度所需要的平均加速度, 其值越大, 后车 (或前车) 所采取的加速 (或制动) 操作空间就越大, 对驾驶员来说操作空间越大, 故而追尾事故风险越小; 反之, 追尾事故风险越大。针对长大下坡路段大货车惯性大, 方向控制较困难, 保证安全运行状态主要靠控制车速与车距的特点, CDR 能综合考虑前后车辆车速条件及间距条件的不确定性, 相对准确地描述跟驰状态下车辆在某时刻的追尾风险, 故而选取 CDR 作为连续下坡路段货车追尾风险分析指标, 其计算如式 (1) 所示:

$$CDR = \frac{\Delta V_i}{TH_i}, \quad (1)$$

式中, CDR 为碰撞减速率; ΔV_i 为前后车速差; TH_i 为前后车车头时距。

在 CDR 指标的计算中, 当 $\Delta V_i < 0$ 时 (后车速度小于前车速度), 两车间距在逐渐变大, 后车没有逼近前车的趋势, 因此本研究只选取 $\Delta V_i > 0$ 的 CDR 数据, 观测 CDR 样本个数分布信息如下: 263 (K2084), 2 228 (K2088), 225 (K2110), 851 (K2114)。

3 CDR 阈值及连续下坡路段追尾事故风险模型

3.1 CDR 阈值的确定

CDR 表示前后车辆在一个车头时距的时间间隔内 (假设一车做匀速运动, 另一车做匀变速运动),

后车加速 (或前车减速) 使两车达到相等速度所需要的平均加速度, 不同的阈值代表的危险性也不一样, 故而需要先确定 CDR 的阈值。

分别采用正态分布、对数正态分布、威布尔分布对 CDR 数据的频率分布直方图进行拟合, 得到各个假定分布下的分布拟合曲线, 如图 4 所示, 拟合数据结果如表 2 所示。当拟合优度参数 R^2 值越接近于 1 时, 说明原数据所假定分布的拟合效果越好。通过累计比例关系图 P-P 图 (图 5) 进行了拟合效果的对比分析, P-P 图是根据变量的累积比例与指定分布的累积比例之间的关系所绘制的图形。通过 P-P 图可以检验数据是否符合指定的分布。当数据符合指定分布时, P-P 图中各点近似呈一条直线。分析结果如下:

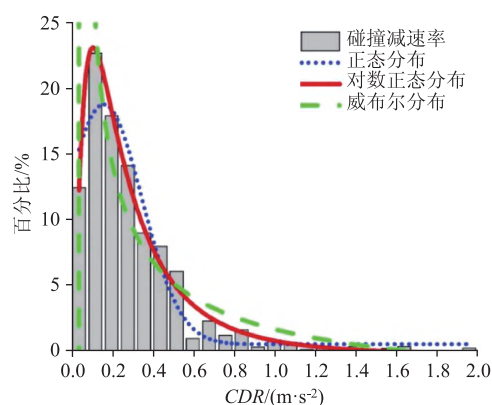


图 4 CDR 直方图与拟合分布

Fig. 4 CDR histogram and fitting distribution

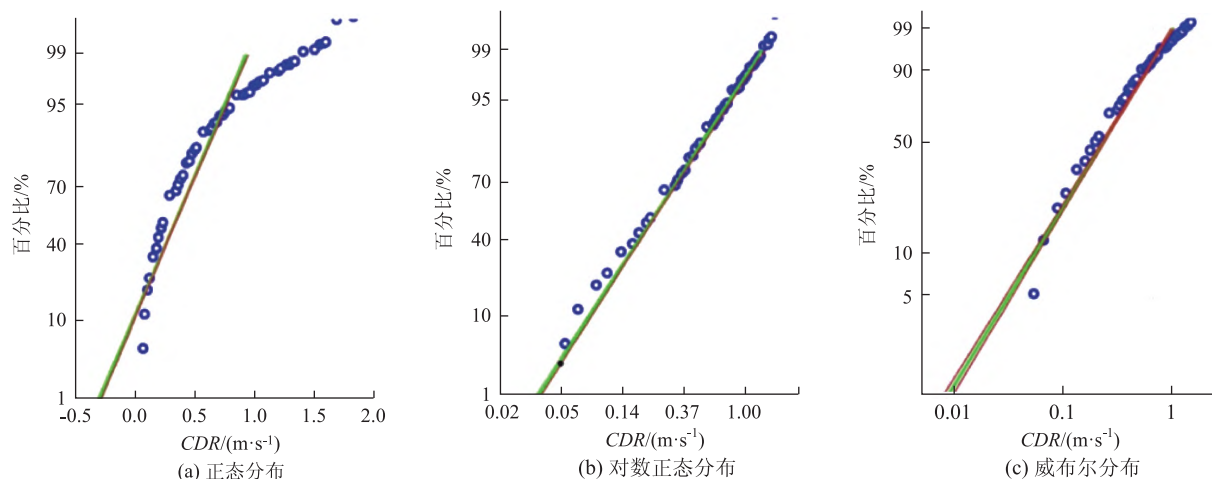


图 5 3 种分布的 P-P 图分析结果

Fig. 5 P-P diagram analysis result of 3 distributions

(1) 在图 4 中可以看到 3 种分布的拟合曲线对于条形的 CDR 数据的拟合程度均较好, 正态分布的拟合曲线对于样本数据的拟合优度为 0.944 61 (拟合优度计算结果见表 2), 该拟合曲线在 $CDR >$

0.3 m/s^2 时曲线与样本频率直方图拟合程度较高, 但当 $0 m/s^2 < CDR < 0.3 m/s^2$ 时, 拟合曲线的峰值处与样本数据峰值存在较大的偏差 (约为 4.45%); 威布尔分布的拟合曲线对于样本数据的拟合优度为

0.924 70, 但在拟合曲线的峰值处数值远大于 CDR 频率直方图的峰值, 且在 $CDR > 0.5 \text{ m/s}^2$ 的曲线段, 曲线数值均高于样本数据数值; 对数正态分布的拟合曲线对于样本数据的拟合优度为 0.985 51, 曲线整体拟合效果良好, 拟合曲线的峰值处与样本数据峰值偏差小 (约为 0.45%)。

(2) 从 P-P 图 (图 5) 可以看出, 对于正态分布, 图中各点不成一条直线, 说明 CDR 数据并不符合该分布; 而对于对数正态分布以及威布尔分布, 它们的图中各点均近似呈一条直线, 说明 CDR 数据对两种分布的符合性均较高。

(3) 基于以上亮点的分析, 对数正态分布的拟合效果最好, 所以本研究将 CDR 的概率分布确定为对数正态分布, 其均值 μ 与标准差 σ 分别为 -1.521 2, 0.782 7, 并根据拟合的对数正态分布, 选取 85% 分位值作为追尾事故风险的 CDR 阈值 (记为 CDR_{85}), 其值为 $0.491 6 \text{ m/s}^2$ 并定义大于该阈值的 CDR 为危险 CDR 样本, 危险 CDR 样本总个数为 518。

表 2 CDR 数据拟合参数Tab. 2 CDR data fitting parameters

分布类型	参数	数值	拟合优度 R^2
正态分布	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$	μ 0.297 55 σ 0.263 99	0.944 74
对数正态分布	$f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$	μ -1.521 2 σ 0.782 7	0.984 67
威布尔分布	$f(x) = \frac{b}{a} \left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} \exp(-(x/a)^b)$	a 1.285 69 b 0.324 3	0.923 78

注: μ 和 σ 分别为均值和标准差; a 和 b 分别为威布尔分布的比例参数和形状参数; 拟合优度 R^2 的值越接近 1, 说明回归直线对观测值的拟合程度越好。

3.2 基于 CDR 的追尾事故风险模型

以危险 CDR 为基础, 参考碰撞潜力指数 (CPI), 有研究^[18]表明, 采用碰撞潜力指数公式 (CPI) 来计算后车的避免碰撞减速率 ($DRAC$) 超过最大可用减速率 ($MADR$) 的概率, 能较好地识别出碰撞与非碰撞情况, 且具有较高的识别精度, 故而以危险 CDR 为基础, 参考碰撞潜力指数 (CPI) 公式, 提出连续下坡货车追尾事故的概率风险模型, 其计算如式 (2) 所示:

$$P_T = \frac{\sum_{t=0}^N P_r(CDR_i(t) > CDR_{85}) \times \Delta t}{T}, \quad (2)$$

式中, P_T 为所取时间段 T 内的概率风险; T 为所取

时间段长度 ($T = N \times \Delta t$); N 为时间段个数; $P_r(CDR_i(t) > CDR_{85})$ 为 $t=i$ 时 Δt 内大于 CDR_{85} 的 CDR 样本频率。

该概率风险可以反映在连续下坡路段车辆发生追尾事故的可能性。概率风险越大, 说明所取时段内, 路段上逼近趋势较强的连续两车占比越大, 则发生追尾事故的可能性就越大, 反之则越小。

4 连续下坡路段追尾事故风险模型的应用与验证

将基于 CDR 的追尾事故模型应用于试验所处的交通特管区连续下坡路段, 结合所得货车 CDR 数据得出该连续下坡路段的货车追尾事故概率风险, 并对结果进行显著性分析, 最后以路段内事故数据对风险分析结果进行了验证。

4.1 追尾事故风险计算

根据式 (2) 计算得到连续下坡路段货车追尾事故概率风险, 结果见表 3。

表 3 追尾事故概率风险计算结果

Tab. 3 Calculation result of rear-end collision accident probability risk

时间段	$P_T/\%$				
	K2084	K2088	K2110	K2114	总体
00:00—6:00	0.000	11.163	0.000	5.556	10.889
6:00—12:00	7.094	15.327	1.515	13.492	14.850
12:00—18:00	3.421	15.541	11.301	17.178	16.103
18:00—24:00	4.167	13.994	14.502	15.147	16.198
00:00—24:00	3.670	14.006	6.830	12.843	14.510

4.2 追尾事故风险分析

追尾风险计算结果由图 6 所示。从图中可以看出测点 K2088 与 K2114 的追尾概率风险整体上大于其他两测点; 18:00—24:00 时间段的追尾概率风险整体上最高。本研究利用单因素 ANOVA 分析了 4 个高清卡口测点及 4 个时间段的概率风险是否存在差异性, 结果见表 4 及表 5。

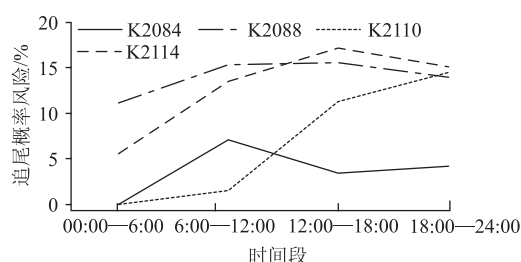


图 6 追尾风险计算结果

Fig. 6 Calculation result of rear-end collision risk

表 4 不同时间段的追尾风险 ANOVA 结果

Tab. 4 ANOVA result of rear-end collision risk in different time periods

时间段	追尾概率风险	
	均值/%	P 值
00:00—6:00	4.179 8	0.243
6:00—12:00	9.357 0	
12:00—18:00	11.860 3	
18:00—24:00	11.952 5	

由表 4 可知, 12:00—18:00, 18:00—24:00 两时间段的概率风险均值相当, 且较高, 可以认为在 12:00—18:00, 18:00—24:00 时间段内发生事故的可能性更大, 但并不能说明 12:00—18:00, 18:00—24:00 时间段的追尾风险更高。由单因素 ANOVA 结果可知, 各个时间段下的追尾概率风险均值在显著性水平 0.05 下没有显著性差异 ($P=0.243$), 及各时间段下的概率风险没有明显差异, 说明 4 个时间段的追尾风险水平相同。

表 5 不同测点的追尾风险 ANOVA 结果

Tab. 5 ANOVA result of rear-end collision risk at different measurement points

测点位置	追尾概率风险	
	均值/%	P 值
K2084	3.670 5	0.028
K2088	14.006 3	
K2110	6.829 5	
K2114	12.843 3	

由表 5 可知, K2088, K2114 的概率风险明显高于 K2084, K2110, 说明在测点 K2088, K2114 上发生追尾事故的可能性更大。由单因素 ANOVA 结果可知, 各测点的追尾概率风险均值在显著性水平 0.05 下有显著性差异 ($P=0.028$), K2088, K2114 具有较高的追尾风险水平。

4.3 追尾事故风险结果验证

为了验证模型计算结果的有效性, 采用 2013—2018 年高清卡口附近追尾事故数据对其进行验证。将计算所得的追尾概率风险均值与各测点附近 1 km 的百万车事故率进行对比验证, 由计算所得各测点附近 1 km 的百万车事故率分别为 0.528 8 次/(百万车·km), 0.951 8 次/(百万车·km), 0.564 0 次/(百万车·km), 1.057 5 次/(百万车·km), 对比结果如图 7 所示。

由图 7 可以看出, 测点的追尾概率风险均值与其附近百万车公里事故率的变化趋势基本相符, 下

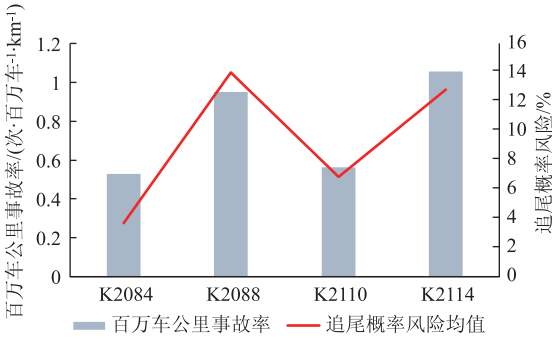


图 7 事故率与概率风险对比

Fig. 7 Comparison of accident rate and probability risk

面从变化趋势一致性对各测点事故率与概率风险均值进行数据验证, 采用皮尔逊相关系数来评估事故率与概率风险均值数据的变化趋势是否一致, 其计算如式 (3) 所示:

$$r(X, Y) = \frac{Cov(X, Y)}{\sqrt{Var[X] \cdot Var[Y]}}, \quad (3)$$

式中, X, Y 分别代表随机变量, 这里为事故率与概率风险均值; $Cov(X, Y)$ 为变量 X, Y 的协方差; $Var[X], Var[Y]$ 分别为随机变量 X, Y 的方差。

最终计算结果事故率数据与概率风险数据相关系数 $r(X, Y)=94.5\%$, 为强相关, 即事故率数据与概率风险数据的变化趋势一致性强。

5 结论

货车在连续下坡上行驶时, 由于其惯性较大, 刹车距离较长, 容易引起追尾事故的发生, 并且货车追尾事故造成的伤亡与财产损失比普通汽车追尾事故更为严重。本研究利用西部某高速公路交通特管区长下坡路段的高清卡口所记录的大量行车数据 (23 205 组), 通过速差与车头时距计算得到碰撞减速率 CDR 数据, 对高速公路连续下坡路段货车追尾事故风险进行研究, 得到以下结论:

- (1) 西部某高速公路交通特管区长下坡路段货车 CDR 样本服从对数正态分布, 得到 85% 分位值作为危险 CDR 阈值为 $0.491\ 6\ m/s^2$ 。
- (2) 计算得到各时间段下的追尾概率风险均值分别为 4.18% (00:00—06:00), 9.36% (06:00—12:00, 11.86% (12:00—18:00), 11.95% (18:00—24:00), 但单因素 ANOVA 分析结果显示, 各个时间段下的追尾概率风险均值在显著性水平 0.05 下没有显著性差异。
- (3) 计算得到各测点的追尾概率风险均值分别为 3.67% (K2084), 14.01% (K2088), 6.83% (K2110),

12.84%(K2114), 并且单因素 ANOVA 分析结果显示, 各测点的追尾概率风险在显著性水平 0.05 下有显著性差异。

(4) 通过皮尔逊相关系数, 以各测点附近的百万车公里事故率对本研究模型进行有效性检验, 计算得到事故率数据与概率风险数据相关系数 $r(X, Y) = 94.5\%$, 为强相关, 即事故率数据与概率风险数据的变化趋势一致性强。

本研究在分析连续下坡路段货车追尾风险的基础上, 针对跟驰状态下大货车的运行特性, 选取 CDR 作为追尾风险指标, 采用实测数据, 分析具体路段的货车追尾事故风险, 分析了该路段上各测点及各个时间段下的货车追尾概率风险, 对比风险与实际事故数据, 验证了本研究提出的连续下坡路段追尾事故风险模型, 可为该路段交通安全管理或交通安全设施的设计提供参考, 本研究方法也适用于高速公路中其他路段的行车风险研究。

同时, 在模型验证中, 虽然基于 CDR 的连续下坡路段货车追尾事故风险评价结论与该路段的实际事故数据具有相同的变化趋势, 但由于采用数据存在部分欠缺, 目前应用 CDR 展开风险评价存在一定的缺陷, 在今后的研究中应采用更多测点来进行数据收集, 并可对风险模型的可移植性进行研究。

参考文献:

References:

- [1] 国家统计局编. 中国统计年鉴 2019 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook 2019 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [2] 公安部交通管理局. 2014 年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, 2015.
Traffic Management Bureau of Ministry of Public Security. Road Traffic Accidents Statistical Annual Report of the People's Republic of China in 2014 [R]. Beijing: Traffic Management Bureau of Ministry of Public Security, 2015.
- [3] 丁乃侃, 朱顺应, 王红, 等. 不连续边缘标线影响追尾风险的结构方程模型 [J]. 中国安全科学学报, 2017, 27 (3): 106-110.
DING Nai-kan, ZHU Shun-ying, WANG Hong, et al. Structural Equation Model for Effects of Edge Line Markings on Risk of Rear-end Collision [J]. China Safety Science Journal, 2017, 27 (3): 106-110.
- [4] 刘鑫鑫. 高速公路追尾事故严重程度影响因素分析及预防对策研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2016.
LIU Xin-xin. Analysis of Influencing Factors and Prevention Countermeasures for Serious Degree of Expressway Rear-end Crash [D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [5] 赵杨东. 高速公路追尾事故成因分析及预防对策研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
ZHAO Yang-dong. Analysis of Causes and Prevention Countermeasures of Expressway Rear-end Crash Accident [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [6] ZHANG J J, WANG Y P, LU G Q. Impact of Heterogeneity of Car-following Behavior on Rear-end Crash Risk [J]. Accident Analysis and Prevention, 2019, 125: 275-289.
- [7] 陆斯文, 张兰芳, 方守恩. 高速公路追尾机理概率分析及风险评价 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2011, 39 (8): 1150-1154.
LU Si-wen, ZHANG Lan-fang, FANG Shou-en. Probabilistic Analysis and Risk Evaluation of Highway Rear-end Collision [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2011, 39 (8): 1150-1154.
- [8] 史海燕. 高速公路汽车追尾机理分析及仿真研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2010.
SHI Hai-yan. Mechanism Analysis and Simulation Research of Expressway Vehicle Rear End Crash [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2010.
- [9] 刘晓阳. 高速公路车辆追尾概率模型及其仿真研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2009.
LIU Xiao-yang. Study on Probability Model and Simulation of Expressway Vehicle Rear-end Collision [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2009.
- [10] 袁守利, 郭铮. 考虑驾驶员反应时间的车辆碰撞预警模型 [J]. 安全与环境学报, 2021, 21 (1): 270-276.
YUAN Shou-li, GUO Zheng. A Warning Model for Vehicle Collision on Account of the Reaction Time of the Driver [J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21 (1): 270-276.
- [11] MINDERHOUD M M, BOVY P H L. Extended Time-to-collision Measures for Road Traffic Safety Assessment [J]. Accident Analysis and Prevention, 2001, 33 (1): 89-97.
- [12] 王佳丽. 雾天高速公路连环追尾事故风险产生机理研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
WANG Jia-li. Study on Mechanism of Risk of Expressway Serial Rear Crash on Fog Day [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.

(下转第 238 页)

- 报, 2020, 33 (11): 55-64.
- HU Xiao-wei, SONG Lang, YANG Bin-yu, et al. Optimal Matching of Urban Emergency Medical Supplies under Major Public Health Events [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33 (11): 55-64.
- [15] 赵建有, 韩万里, 郑文捷, 等. 重大突发公共卫生事件下城市应急医疗物资配送 [J]. 交通运输工程学报, 2020, 20 (3): 168-177.
- ZHAO Jian-you, HAN Wan-li, ZHENG Wen-jie, et al. Distribution of Emergency Medical Supplies in Cities under Major Public Health Emergency [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20 (3): 168-177.
- [16] 陈丰, 丁文龙, 叶一芄, 等. 公共卫生事件暴发初期的医疗物资调度优化 [J]. 中国公路学报, 2020, 33 (11): 65-72.
- CHEN Feng, DING Wen-long, YE Yi-peng, et al. Optimal Coordination Model of Medical Commodities in the Initial Stage of the Outbreak of Public Health Events [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33 (11): 65-72.
- [17] 魏明, 靳文舟, 孙博. 求解区域公交车调度问题的蚁群算法研究 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (6): 141-145, 152.
- WEI Ming, JIN Wen-zhou, SUN Bo. Ant Colony Algorithm for Regional Bus Scheduling Problem [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (6): 141-145, 152.
- [18] 白建龙, 陈瀚宁, 胡亚宝, 等. 基于负反馈机制的蚁群算法及其在机器人路径规划中的应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25 (7): 1767-1774.
- BAI Jian-long, CHEN Han-ning, HU Ya-bao, et al. Ant Colony Algorithm Based on Negative Feedback and Its Application on Robot Path Planning [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25 (7): 1767-1774.
- [19] 刘云, 张惠珍. 多目标带时间窗的车辆路径问题的单亲遗传混合蚁群算法 [J]. 公路交通科技, 2016, 33 (6): 95-100, 106.
- LIU Yun, ZHANG Hui-zhen. A Partheno-genetic Hybrid Ant Colony Algorithm for Solving Multi-objective Vehicle Routing Problem with Time Window [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33 (6): 95-100, 106.
- [20] 李佳盛. 基于改进蚁群算法的旅行商路径优化问题研究 [J]. 中国物流与采购, 2020 (17): 47-48.
- LI Jia-sheng. Research on Route Optimization Problem of Traveling Salesman Based on Improved Ant Colony Algorithm [J]. China Logistics and Purchasing, 2020 (17): 47-48.

(上接第195页)

- [13] 徐华中, 熊和金. 汽车追尾与交通流混沌模型研究 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2006, 30 (1): 85-87.
- XU Hua-zhong, XIONG He-jin. Study on End Collision of Motorcars and Chaos Model of Traffic Flow [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering Edition), 2006, 30 (1): 85-87.
- [14] 孟凡兴, 张良, 张伟. 驾驶员车头时距研究 [J]. 工业工程与管理, 2013, 18 (2): 131-135, 140.
- MENG Fan-xing, ZHANG Liang, ZHANG Wei. A Study on Drivers' Time Headway [J]. Industrial Engineering & Management, 2013, 18 (2): 131-135, 140.
- [15] 徐进, 孙子秋, 龙岩松, 等. 基于自然驾驶数据的跨江大桥小客车跟驰特性研究 [J]. 中国公路学报, 2022, 35 (5): 170-178.
- XU Jin, SUN Zi-qiu, LONG Yan-song, et al. Car-following Behavior of Passenger Cars on River Crossing Bridge Based on Naturalistic Driving Data [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35 (5): 170-1778.
- [16] 黄崇福. 风险分析基本方法探讨 [J]. 自然灾害学报, 2011, 20 (5): 1-10.
- HUANG Chong-fu. Discussion on Basic Methods for Risk Analysis [J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20 (5): 1-10.
- [17] 彭奕华. 卡口高清视频监控信息采集系统 [J]. 自动化与仪表, 2017 (11): 84-86.
- PENG Yi-hua. High Definition Video Surveillance Information Acquisition System for Bayonet [J]. Automation & Instrumentation, 2017 (11): 84-86.
- [18] ZHAO P B, LEE C. Assessing Rear-end Collision Risk of Cars and Heavy Vehicles on Freeways Using a Surrogate Safety Measure [J]. Accident Analysis and Prevention, 2018, 113: 149-158.