

基于停车视距的高速公路下坡段 货车制动可靠性

张 航¹, 熊宇豪¹, 吕能超²

(1. 武汉理工大学 交通与物流工程学院, 武汉 430063; 2. 武汉理工大学 智能交通系统研究中心, 武汉 430063)

摘 要:为进一步提升货车制动过程的安全性,对高速公路下坡段货车停车视距可靠性进行了研究,构建了考虑防抱死制动系统(ABS)的4阶段停车视距模型。该模型引入可靠度理论,采用蒙特卡罗方法对高速公路下坡段货车停车视距可靠度进行分析,给出货车停车视距建议值。同时,通过工程实例与 TruckSim 仿真验证模型的合理性。结果表明:停车视距失效概率与事故率有正相关性;可靠度模型计算值误差较规范值更小,结果更加保守。本文研究成果对降低道路安全风险具有一定的现实意义。

关键词:道路工程;可靠度理论;停车视距;货车;高速公路;TruckSim

中图分类号:U412.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2026)02-0383-10

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240764

Reliability of truck braking on downhill sections of highways based on stopping sight distance

ZHANG Hang¹, XIONG Yu-hao¹, LYU Neng-chao²

(1. School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

2. Intelligent Transportation Systems Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: In order to further improve the safety of truck braking process, the reliability of truck stopping sight distance on downhill section of highway is studied. A four-stage stopping sight distance model considering the ABS is constructed. The reliability theory is introduced to analyze the reliability of truck stopping sight distance on the downhill section of the highway by using Monte Carlo method, and the suggested value of truck stopping sight distance is given. Furthermore, the rationality of the model is verified by engineering examples and TruckSim simulation. The results show that there is a positive correlation between the probability of stopping sight distance failure and the accident rate; the error of the calculated value of the reliability model is smaller than the standardized value, and the results are more conservative. It shows that the research results have certain practical significance for reducing road safety risks.

Key words: highway engineering; reliability theory; stopping sight distance; truck; highway; TruckSim

0 引 言

根据调查^[1,2],我国交通事故中货车事故占比

超过 25%,货车事故死亡人数约占道路交通事故死亡总数的 39.6%,特别是位于高速公路下坡段

收稿日期:2024-07-10.

基金项目:国家自然科学基金项目(52072290);湖北省重点研发计划项目(2022BAD142).

作者简介:张航(1967-),男,副教授,博士.研究方向:道路规划与设计,路线设计理论与方法,道路交通安全设计与评价.E-mail:zhanghang1999@sina.com

的重型货车极易造成群死群伤事故。大多数交通事故的发生与视距有密切关系。从小汽车与货车的差异性分析事故原因,货车普遍的超速超载运输现象、长距离运输模式下地域路况的不确定性、偏低硬件配置导致的下坡段制动困难、驾驶员较重的疲劳程度等多种人-车-路不利因素协同作用,使得货车停车视距安全性大大低于小汽车。因此,有必要单独对高速公路下坡段货车停车视距开展安全性研究。

近年来,国内外学者开始关注货车停车视距问题,并开展了一系列研究。德国 Daimler AG 公司和载重车辆制动研究机构^[3]共同运用雷达探测技术得出了载重车应该保持的行车距离值。Qin 等^[4]利用数值分析方法研究了不同集料特性对货车制动距离的影响。吴善根等^[5]提出了基于制动减速度的不同纵坡条件下货车停车视距修正值。Mavromatis 等^[6]考虑货车减速率与路段垂直净空率的影响,研究了不同设计速度下立交桥区域的货车停车视距。这些对货车停车视距及安全行车间距的研究大多为确定性研究。这种确定性研究虽然方便开展,但往往无法定量表征研究对象在实际情况中的安全程度。而可靠性设计方法可以反映交通事故的随机性,通过可靠概率反映道路安全水平。1992 年 Navin^[7]首次将可靠度理论引入道路设计中;后续 Chen 等^[8]提出了一种考虑设计参数模糊性和随机性的制动视距模型,给出了制动视距模糊可靠度的计算方法。盛旭高等^[9]采用蒙特卡罗模拟方法研究了强降雨环境下公路车辆制动安全可靠度。但以上视距可靠性研究主要针对小客车,针对货车停车视距及其影响因素的相关研究仍较少。

鉴于此,本文考虑防抱死制动系统(Antilock brake system, ABS)对货车制动过程的影响,建立更符合货车实际制动过程的停车视距模型。综合考虑货车超载、不同路面摩擦指数、驾驶员疲劳状态等因素的协同作用,引入可靠度理论,采用蒙特卡罗模拟方法研究不同设计速度下高速公路货车下坡路段停车视距可靠度,并给出相应建议值,以为高速公路货车安全运营管理提供参考。

1 建立停车视距模型

《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)^[10](以下简称“规范”)将汽车制动过程分为 2 个部分:①驾驶员在反应阶段内行驶的距离 L_1 (m);②车辆制动开始至完全停止行驶的距离 L_2 (m)。

具体计算公式为:

$$L_{\text{停}} = L_1 + L_2 = \frac{v_0}{3.6} t_1 + \frac{(v_0/3.6)^2}{2gf_1} \quad (1)$$

式中: v_0 为汽车发现障碍物前的行驶速度,km/h; t_1 为驾驶员反应时间,s; g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 ; f_1 为纵向摩擦系数。

这种计算方式与车辆实际制动过程存在一定偏差。规范^[10]假定在驾驶员踩下刹车时制动力便瞬间达到最大值,之后保持最大制动力直至车辆停止。但实际上,由于制动踏板存在自由行程、制动蹄片与制动鼓间存在间隙等因素,从踏下制动踏板到制动力出现需要一定时间,并且制动力是逐渐上升至最大值的^[5]。此外,《机动车运行安全技术条件》(GB 7258—2017)^[11](以下简称“条件”)规定,我国的大型货车必须安装 ABS。为控制车辆滑移率,ABS 会在车辆制动过程中进行“增压-保压-减压”循环过程,直至车辆完全停下^[12]。在其影响下,此阶段车辆的制动减速度为变化值,这也导致规范^[10]中使用定值描述车辆减速度的方法不再准确。因此,本文细化车辆制动过程,考虑车辆 ABS 带来的影响,重新计算制动减速度,建立新的停车视距模型,如图 1 所示。

(1)图 1 中,反应阶段是指驾驶员发现前方道路的障碍物并用脚触碰制动踏板的过程,包括感应阶段和操作反应阶段,所用时长为 t_1 ,车辆行驶距离 S_1 为:

$$S_1 = v_0 t_1 \quad (2)$$

(2)从驾驶员的脚碰到制动踏板到制动器间隙完全消除并开始产生制动力的过程称为间隙消除阶段,所用时间为 t_2 ,车辆行驶距离 S_2 为:

$$S_2 = v_0 t_2 \quad (3)$$

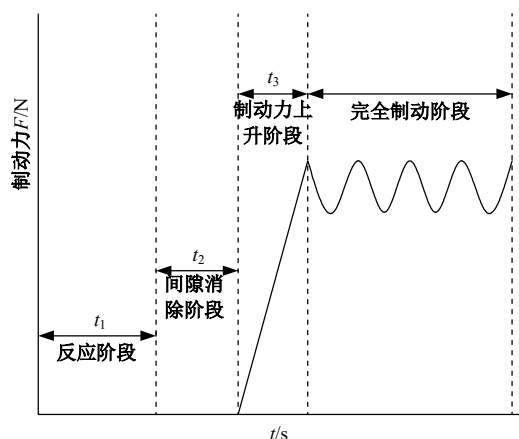


图 1 ABS 影响下的停车视距四阶段模型

Fig 1 Four-stage model of parking sight distance under the influence of the ABS

(3)在脚的作用下制动踏板向下移动,制动力从零开始上升至最大值,制动力的变化过程较为复杂,一般可简化为线性增加。这一过程称为制动力上升阶段,所用时长为 t_3 ,车辆制动距离 S_3 为:

$$S_3 = v_0 t_3 - \frac{1}{6} a_{\max} t_3^2 \quad (4)$$

式中: $a_{\max}$ 为车辆制动过程中所达到的最大制动减速度, m/s^2 。

(4) t_3 时刻末车辆达到最大制动减速度,进入完全制动阶段。为避免车轮在制动过程中抱死,车辆完全停下前会在ABS的控制下进行“增压-保压-减压”循环过程。基于ABS车辆制动力控制理论,可将完全制动阶段减速度简化为半周期余弦函数^[13]。结合车辆动力学,计算车辆制动距离 S_4 ,可得:

$$S_4 = \frac{v_0^2}{24.29 a_{\max}} - \frac{v_0 t_3}{6.75} + \frac{a_{\max} t_3^2}{7.50} \quad (5)$$

将式(2)~式(5)中的车速单位转化为 km/h ,则有停车视距 S 为:

$$S = \frac{v_0(t_1 + t_2)}{3.6} + \frac{v_0 t_3}{7.71} - \frac{a_{\max} t_3^2}{30} + \frac{v_0^2}{24.29 a_{\max}} \quad (6)$$

2 货车停车视距可靠度分析

2.1 可靠度功能函数建立

可靠度是指工程结构在规定的时间与条件下完成预期功能、取得预期效果的概率,记作 P_s 。反之,不能达到预期功能、取得预期效果的概率叫作失效概率,记作 P_f , $P_s + P_f = 1$ 。用于货车停车视距可靠度分析的功能函数有两部分:①由道路为货车驾驶员提供的停车视距,即我国现行规范与标准规定值;②为保证货车驾驶员行车安全实际需要的停车视距。

货车停车视距可靠度的功能函数 D 为:

$$D = f(s) = S_R - S_s \quad (7)$$

式中: S_R 为停车视距规定值, m ; S_s 为保证安全行车所需的停车视距, m 。

《公路工程技术标准》(JTG B01—2014)^[14](以下简称“标准”)规定,货车下坡段停车视距应随坡度大小进行修正。高速公路停车视距规范与标准规定值如表1所示。

2.2 可靠度功能函数参数分析

功能函数 D 涉及的变量较多,现将货车运行速度、最大制动减速度、驾驶员反应时长作为随机变量。由于不同种类的货车采用不同的制动器,

表1 下坡段货车停车视距规定值

Table 1 Specified value of stopping sight distance for trucks on downhill sections m

纵坡坡度/%	设计速度/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)		
	120	100	80
0	245	180	125
3	265	190	130
4	273	195	132
5		200	136
6			139

即使是同种制动器也会因使用时长、保养频率不同等因素造成性能差异,难以用统一标准衡量。因此将间隙消除阶段时长、制动力上升阶段时长作为确定性变量进行分析。

2.2.1 货车下坡运行速度确定

利用专业车辆分型统计系统MetroCount5600进行车型划分及速度测量,记录华中地区设计速度分别为80、100、120 km/h 的3条高速公路下坡路段货车的运行速度。为使结果更准确,所选取路段为直线或半径较大的平曲线,以尽可能降低弯道对车速的影响。研究^[15]表明,下坡路段货车最大运行速度常出现于坡顶附近,且运行速度符合logistic分布规律。因此,测速区间设置在坡顶以下100~300 m ,对数据进行筛选整理,拟合所得logistic参数见表2。

表2 华中地区某高速公路下坡断面货车车速相关参数

Table 2 Related parameters of truck speed on downhill section of a highway in central China

设计速度/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	样本 数	正态参数/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)		logistic参数	
		平均值	标准差	位置参数	尺度参数
80	785	63.611	6.197	63.611	3.417
100	942	80.765	7.124	80.765	3.928
120	938	97.525	8.211	97.525	4.527

2.2.2 最大制动减速度确定

下坡段最大制动减速度的计算公式如式(8)所示。由式(8)可知,最大制动减速度的影响因素为道路纵坡 i 和路面附着系数 φ 。而传统研究中的路面附着系数规定值是在试验值的基础上得来的,并未考虑ABS的影响,因此需要对路面附着系数进行修正。

$$a_{\max} = (\varphi - i)g \quad (8)$$

式中: φ 为修正后的路面附着系数。

文献[16]给出了考虑车辆滑移率与车速影响的路面附着系数计算公式,如式(9)所示:

$$\varphi_{\text{eff}} = \mu_s - \alpha \varepsilon v \quad (9)$$

式中: μ_s 为摩擦因数; α 为修正系数, 取常数 0.005; ϵ 为滑移率; v 为车辆行车速度, km/h。

将式(9)代入式(8), 得到更加符合实际制动过程的最大制动减速度计算公式, 如式(10)所示:

$$a_{\max} = (\mu_s - \alpha\epsilon v - i)g \quad (10)$$

(1) 路面摩擦指数

研究^[1]发现, 路面潮湿、不利天气和低温是导致货车严重事故的重要环境因素。原因主要是降雨、降雪、结冰等会降低路面摩擦因数, 使货车制动距离变长。我国地域辽阔, 各地区道路潮湿、结冰等状况不同, 同一地区在不同天气影响下路面摩擦状态也不相同。为使摩擦因数的选取更有针对性, 引入路面摩擦指数概念, 结合谢静芳等^[17]与齐聪^[18]的研究成果, 根据路面实际摩擦因数与对应路面状况对道路进行分级, 如表 3 所示。

需要说明的是, 表 3 中的路面状况对应新建公路。实际状况下, 路面抗滑性能随时间的推移会发生变化。我国公路沥青路面抗滑性能主要由横向力系数 SFC_{60} 与构造深度 TD (mm) 来反映。王元元^[19]通过对 SMA 沥青路面开展室内试验与现场测试, 总结了横向力系数 SFC_{60} 随时间推移先上升、后下降并最终长久趋于稳定的变化规律, 其实测结果表明其稳定值均值约为磨耗前的 0.88 倍。这一结果与 Kane 等^[20]的研究结论(路面摩擦因数随时间推移会下降 10%~15%)相吻合。因此, 本文以 0.88 为折算系数, 折算表 3 中的实际摩擦因数。其中, 积雪、结冰路段因路面被冰雪覆盖, 轮胎与路面难以直接接触, 路面摩擦因数主要受温度影响, 无需折算^[17]。

(2) 车辆滑移率确定

ABS 可以将货车的滑移率保持在 15%~20%^[12]区间内, 从而在获得较短制动距离的同时保持最佳的制动稳定性。本文利用 MATLAB 生成 15%~20% 的随机数, 以模拟 ABS 对车辆滑移率的控制。

2.2.3 最大制动减速度折减

河南省高速公路管理部门对高速公路行驶车辆进行了调查统计^[21], 发现 27.74% 的货车存在超载现象。货车超载会导致车辆操作稳定性下降, 制动距离大幅延长, 极易造成交通事故, 因此考虑超载对货车停车视距的影响十分必要。

根据条件^[11]可知, 假设道路附着力充足, 不考虑动力学因素, 忽略汽车的滚动阻力、空气阻力以及旋转质量的惯性矩, 超载率与制动减速度之间可简化为线性关系。为表征货车超载率对制动

表 3 摩擦指数与抗滑性能、摩擦因数及路面状况的关系

Table 3 Relationship of friction index to skid resistance, coefficient of friction and pavement condition

摩擦指数	抗滑性能	实际摩擦因数	对应路面状况
1 级	优异	0.75~0.96	常温、干燥、无杂质
1 级	良好	0.65~0.75	干燥、无积水
1 级	正常	0.56~0.64	潮湿、少量积水
2 级	稍差	0.51~0.55	积水、低温
3 级	较差	0.41~0.50	积水伴浮雪、霜
4 级	很差	0.31~0.40	积雪
5 级	极差	0.18~0.30	结冰

性能的影响, 对式(10)计算出的最大制动减速度进行折减, 得到本文使用的货车最大制动减速度, 如式(11)所示:

$$a'_{\max} = \frac{a_{\max}}{c+1} = \frac{(\mu_s - \alpha\epsilon v - i)g}{c+1} \quad (11)$$

式中: $a'_{\max}$ 为经过超载折减后的货车最大制动减速度, m/s²; c 为货车超载率。

2.2.4 其他参数确定

(1) 驾驶员反应时间 t_1

考虑到货车运输多为长途运输, 容易导致驾驶员疲劳驾驶的特点, 本文参考郭梦竹^[22]研究成果中的重度疲劳状况下驾驶员的反应时间, 其分布情况满足对数正态分布 $N(1.47, 0.06945)$ 。盛旭高等^[9]指出, 强降雨天气易使驾驶员发生思索延时现象, 降雪与降雨对驾驶员视线遮挡情况类似, 因此思索延时时间取 1 s^[9]。

本文中, 当路面为 1 级摩擦指数时, 驾驶员反应时间 t_1 采用重度疲劳状况下驾驶员的反应时间; 当路面为 2 级摩擦指数及以下时, 常伴有降雨、降雪, 驾驶员反应时间 t_1 由重度疲劳状况下驾驶员反应时间与雨雪天思索延时时间两部分组成。

(2) 间隙消除阶段 t_2

潘少猷等^[23]通过对车辆安装制动性能测试仪的方法, 测得载重车间隙消除时间为 0.07 s。这一结果略长于条件^[11]规定的 0.05 s, 也说明货车在制动配置上略低于小汽车。本文参考文献^[23]中对间隙消除阶段时间的取值, t_2 取 0.07 s。

(3) 制动力上升阶段 t_3

条件^[11]规定, 液压制动汽车的制动力上升阶段时长应 ≤ 0.35 s, 气压制动汽车应 ≤ 0.60 s。中、重型货车主要应用气压 ABS。因此, 本文参考条件^[11]对气压制动汽车的规定, t_3 取 0.60 s。

2.3 货车停车视距可靠度求解

由于现有规范中没有对停车视距可靠度作出明确规定,而视距不足引发的事故程度与由路面结构引发的事故程度较接近^[7],因此参考《公路工程结构可靠性设计统一标准》(JTG 2120—2020)^[24],引入对路面结构目标可靠度的规定,见表4。

表4 不同安全等级对应可靠度

Table 4 Reliability for different security levels

项目	结构安全等级		
	一级	二级	三级
公路等级	高速公路	一级公路	二级公路
目标可靠度/%	95	90	85

蒙特卡罗方法是一种应用随机数进行模拟试验的手段,它能够有效地反映交通系统中的不确定性。应用蒙特卡罗方法进行模拟分析,抽样次数越多,模拟精度越高。一般情况下,为保证失效概率估计值的收敛性,样本量 N 需满足式(12)要求^[25]。

$$N = (10^2 \sim 10^4) / P_f \quad (12)$$

以失效概率 $P_f = 5\%$ 作为要求,按式(12)计算得出的最大抽样次数为200 000。本文取抽样次数为500 000,远大于需要的样本量,计算结果满足精度要求。计算步骤如下。

(1)定义抽样次数 $N = 500\,000$,输入公路技术规范行车视距规定值 S_R 、纵坡 i 等变量。其中,纵坡参照表1取值。

(2)货车运行速度由MATLAB根据表2的参数生成logistic分布随机数;驾驶员反应时长由MATLAB生成服从正态分布 $N(1.47, 0.264)$ 的随机数,若路面摩擦指数在2级及以下,则加上思索延时时间;车辆滑移率、各级摩擦指数下的实际摩擦因数由MATLAB在相应区间内随机生成。将计算得到的修正后路面附着系数、制动减速度等代入式(6),计算得到安全停车视距 S_s 。

(3)记录 $S_R - S_s > 0$ 的次数,除以随机抽样次数500 000,得到功能函数 $D > 0$ 的概率,即可靠概率 P_s 。

按以上步骤计算得到设计速度分别为80、100、120 km/h下坡段货车停车视距可靠度,对模拟结果绘制点线图,如图2所示。其中,各点代表对应超载率与路面摩擦指数条件下的货车停车视距可靠概率。

分析、对比图线可看出:

(1)大部分情况下货车停车视距可靠度较高,

但是在货车超载率较高或路面摩擦条件较差时,仍存在较大的安全风险。例如,当货车超载率 $> 100\%$ 时,仅有1级优异摩擦指数条件下的视距可靠度 $> 95\%$;4级及以下摩擦指数条件下,无论货车是否超载,视距可靠度均 $< 75\%$ 。

(2)道路纵坡对高速公路下坡段货车停车视距可靠度的影响不显著,原因可能为规范与本模型均考虑了纵坡对货车制动减速度的影响。设计速度与货车停车视距可靠度成反比,原因可能为现行规范视距计算模型^[9]仅由反应距离与制动距离两部分组成,忽略了制动力上升阶段。此阶段初始车速越高,规范计算方法与本模型计算方法得到的制动距离差异越大,对应的货车停车视距可靠度也越低。

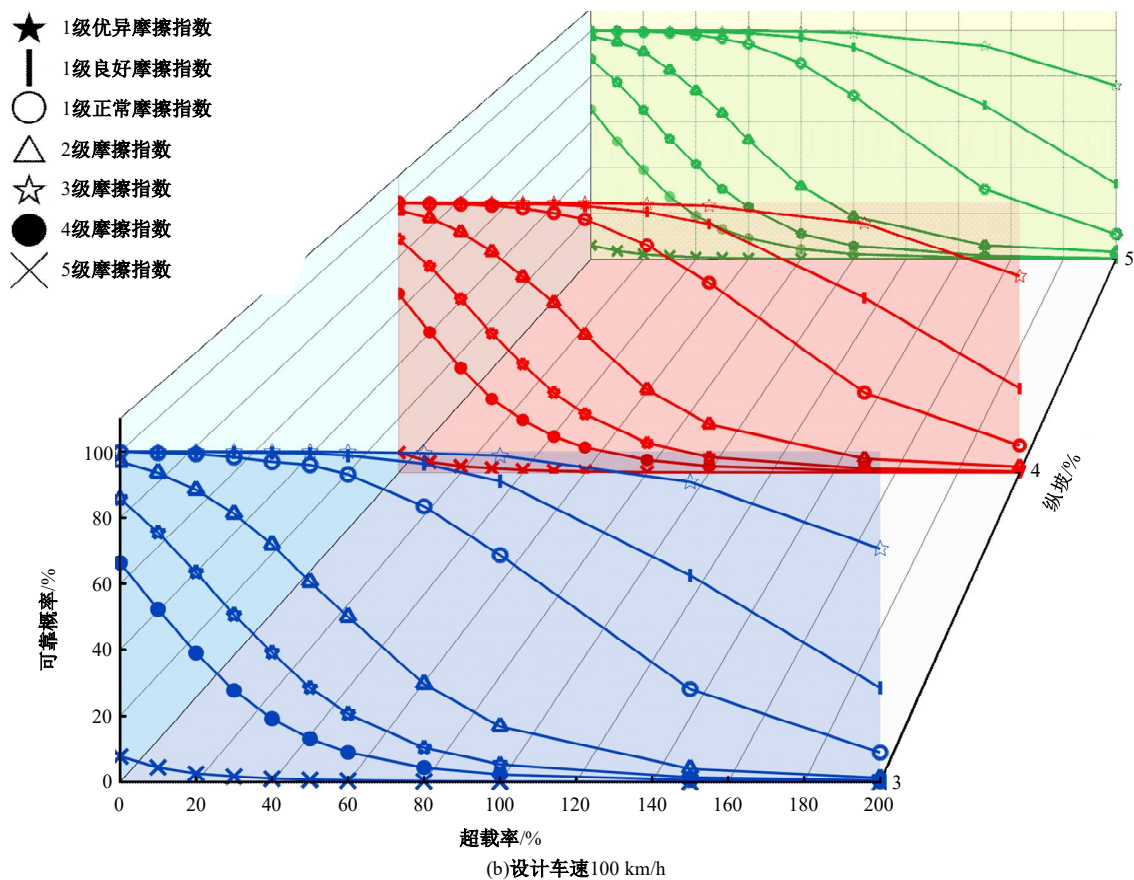
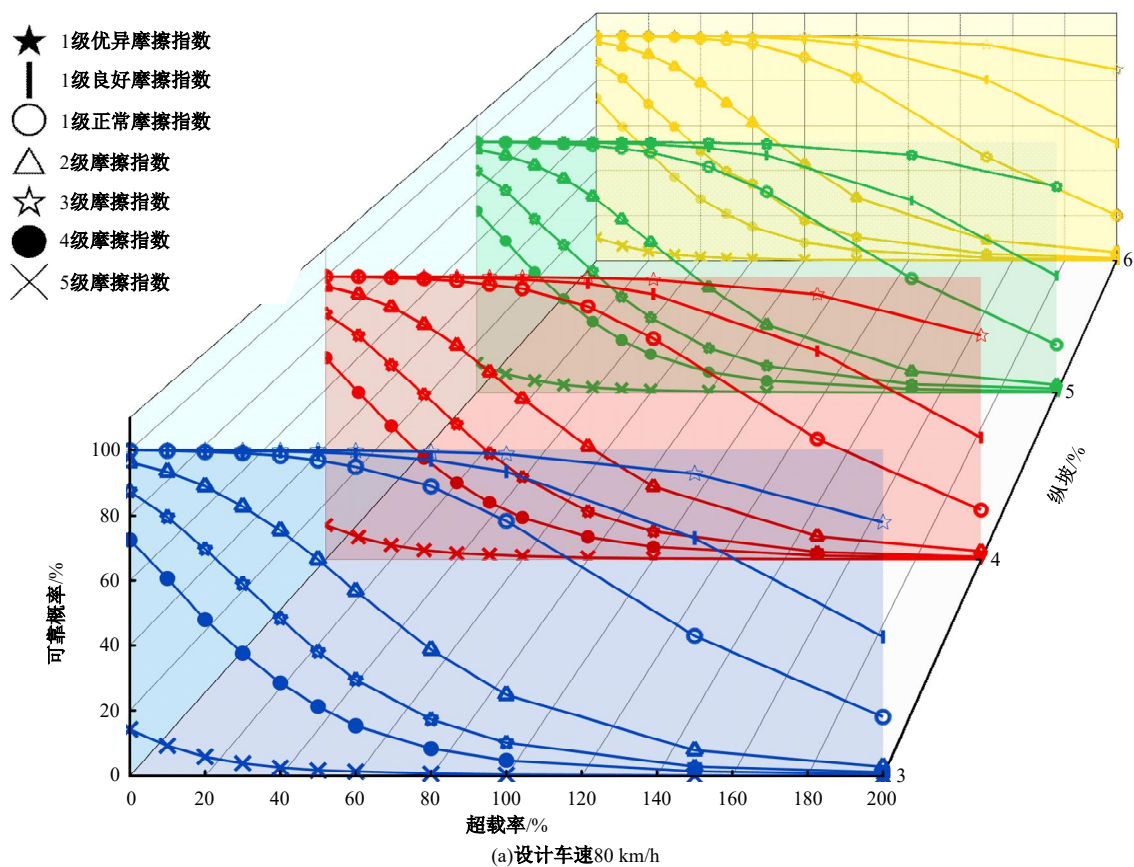
(3)货车停车视距可靠概率与超载率成反比,与路面摩擦指数成正比,且路面摩擦条件越差,超载率对视距可靠度的影响程度越大。因此,需避免货车超载与路面摩擦条件不良两种不利因素同时出现产生协同效应。但往往路面摩擦条件与天气状况有较大关联^[17],具有一定的随机性与即时性,很多时候难以实时调控。因此,严格管控货车超载对提升货车停车视距可靠性、保障道路安全十分必要。

2.4 货车停车视距建议值计算

调查^[19]显示,95%超载货车的超载率 $< 50\%$ 。参考一级结构安全等级的要求,确定货车超载率为50%进行折减,使货车出现超出本模型考虑范围的超载(即发生不可靠事件)的概率为5%。以95%可靠度为目标,反算得到不同路面摩擦指数下的货车停车视距建议值,以期为不同路面状况下高速公路的安全运营管理提供参考,如表5~表7所示。其中,1级路面摩擦指数视距可靠度均 $> 95\%$,考虑安全富余,建议值统一采用规范值。

对比规范值可以看出,2级及以下路面摩擦指数条件下,货车停车视距计算值明显大于现行规范值。2级~4级路面摩擦指数条件下,基于可靠度模型的建议值平均为规范值的1.21倍、1.43倍、1.64倍。5级路面摩擦指数条件(即结冰路面)下高达3.63倍。这表明在天气等因素影响下,路面摩擦条件变化对下坡段货车停车视距影响十分显著。因此,建议在高速公路的安全运营管理中积极评估道路摩擦条件,对状况不佳的路段及时采取动态限速或改善路面摩擦条件等措施,以保障交通安全。

需注意的是,对于5级路面摩擦指数条件,由



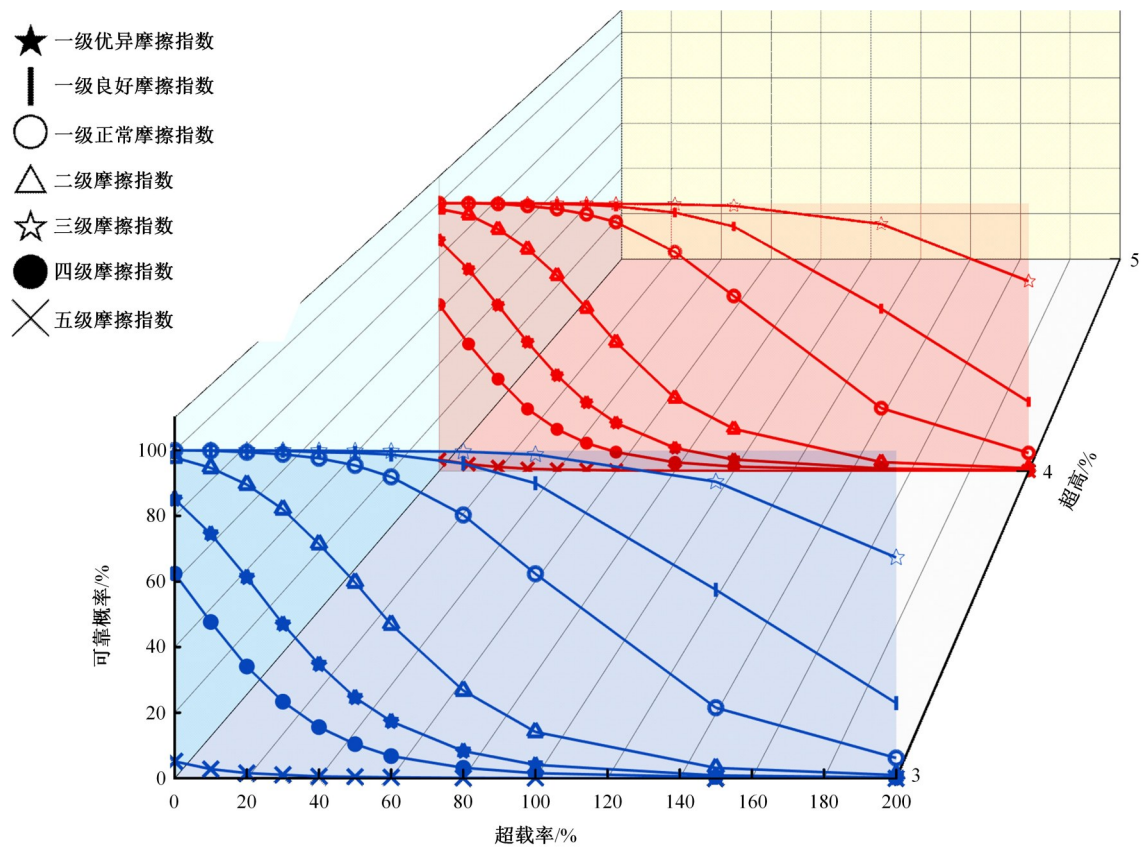


图 2 不同设计车速下下坡段货车停车视距可靠概率曲线

Fig. 2 Reliable probability curve of stopping sight distance for trucks on downhill sections under different design speeds

表 5 设计速度 80 km/h 货车停车视距建议值

Table 5 Suggested value of stopping sight distance for trucks with design speed $v=80$ km/h m

路面摩擦 指数	道路纵坡/%			
	3	4	5	6
1 级	130	132	136	139
2 级	157	159	161	163
3 级	179	182	187	192
4 级	201	207	213	220
5 级	354	385	425	473

表 6 设计速度 100 km/h 货车停车视距建议值

Table 6 Suggested value of stopping sight distance for trucks with design speed $v=100$ km/h m

路面摩擦 指数	道路纵坡/%		
	3	4	5
1 级	190	195	200
2 级	232	237	240
3 级	271	278	285
4 级	308	320	333
5 级	622	698	790

表 7 设计速度 120 km/h 货车停车视距建议值

Table 7 Suggested value of stopping sight distance for trucks with design speed $v=120$ km/h m

路面摩擦 指数	道路纵坡/%	
	3	4
1 级	265	273
2 级	327	333
3 级	390	401
4 级	455	478
5 级	1 072	1 232

车视距值较表 5~表 7 建议值有所下降。因此,从经济性与实际情况出发,建议 5 级路面摩擦指数条件下不直接采用表 5~表 7 中的停车视距建议值,而是参考文献[16,17]的建议,严格对行驶车辆限速或关闭高速公路,直至路面摩擦性能有所改善,以防止车辆碰撞、追尾等交通事故的发生。

3 实例分析

为检验本文所提货车视距模型的适用性,现对货车事故频发的云南某高速公路开展实例分析。自 2003 年通车至 2022 年 3 月,该高速公路某

于路面摩擦性能过差,一部分停车视距甚至大于标准^[14]规定的最大坡长,此时保证车辆具有计算长度的安全跟车距离并不现实。此外,驾驶员在结冰道路上行驶时也会自觉降低车速,其所需停

区段内共发生 1 412 起涉及大货车的交通事故,事故类型如图 3 所示。追尾碰撞、碰撞障碍物等事故一般由视距不足引起,下坡段货车失控也与

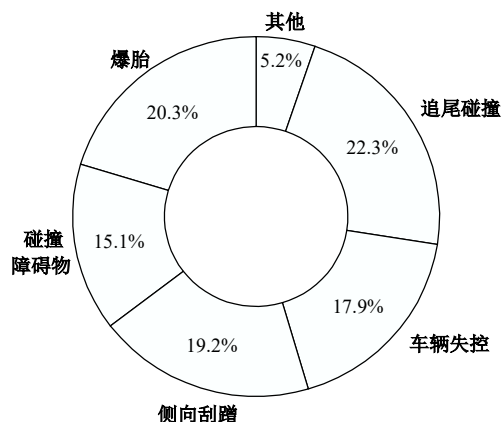


图 3 事故类型分布图

Fig 3 Distribution of accident types

表 8 货车停车视距可靠度实例分析与修正 ($v=80\text{ km/h}$)

Table 8 Example analysis and correction of truck stopping sight distance reliability ($v=80\text{ km/h}$)

序号	桩号范围	纵坡 / %	事故率 / (次·km ⁻¹)	区间车速		失效概率 / %	95%可靠度 视距值 / m
				最大值 / (km·h ⁻¹)	最小值 / (km·h ⁻¹)		
1	K149+40~K149+850	5	20.77	72.7	58.2	38.27	171
2	K152+500~K153+350	4	12.61	71.1	59.9	23.22	153
3	K165+600~K166+740	3	21.88	73.1	60.1	39.51	172
4	K171+800~K172+700	3	15.42	71.7	59.4	28.87	155
5	K176+500~K177+50	5	11.64	69.6	60.6	13.71	148
6	K185+300~K186+100	3	14.77	67.5	61.8	30.43	157
7	K189+900~K190+100	4	15.83	68.6	60.3	27.19	155
8	K197+000~K198+50	3	11.84	65.9	59.9	15.89	149

(1)由表 8 可知,该高速公路事故高发路段货车停车视距失效概率较高,均 $>5\%$ 。提取表 8 中高速公路各区段事故率与失效概率,绘制双 Y 轴折线图(如图 4 所示)。可以看出,路段事故率与停车视距失效概率变化趋势基本一致,随着失效

视距不足有一定联系。为进一步探究视距与交通事故的关系,选取路段范围内交通事故率 >10 次/km 的 8 个下坡区段为研究对象,记录某一时段内通行货车的运行速度,利用模型验算货车视距情况。路段设计速度为 80 km/h,沥青路面,坡度多为 3%~5%,为方便研究,近似取整数值。

该高速公路调查区段地处低纬高原,空气湿度大,降水量多,较多时候符合积水、低温的路况,因此路面摩擦指数取 2 级;每年大量来自缅甸、泰国、越南的水果货物会通过此高速公路运输,且多为重载货车,超载现象时常发生。参考前文分析,货车超载率取 50%。

将上述道路参数及区间车速依次代入可靠度功能函数,利用蒙特卡罗方法计算货车停车视距失效概率,并以 95%为目标可靠度计算停车视距值。路段信息及计算结果整理如表 8 所示。

概率增大,事故率的波动也增大。这表明该路段事故率与停车视距失效概率具有较强的相关性,即停车视距不足容易导致交通事故。

(2)由表 8 中计算的事故高发路段所需满足一级安全等级、95%可靠概率视距可以看出,其较好地符合表 5 中的货车停车视距推荐值。

4 仿真实验

为了进一步验证本文可靠性研究模型的有效性,以实例路段为例,利用 TruckSim 进行货车制动距离仿真分析。公路设计中常用的货车包括载重货车和铰接列车^[9],考虑到实例路段重载铰接列车较多,整车模型参考规范规定的 6 轴铰接列车,由 TruckSim 整车动力学模块建立仿真试验车型,主要参数见表 9,其中载质量取 73 500 kg(超载 50%)。驾驶员模型设定货车运行 10 s 后采取制动操作,期间不采取任何加速、转向和换挡操作。制动器起作用时间设定为 2.5 s,以模拟驾驶

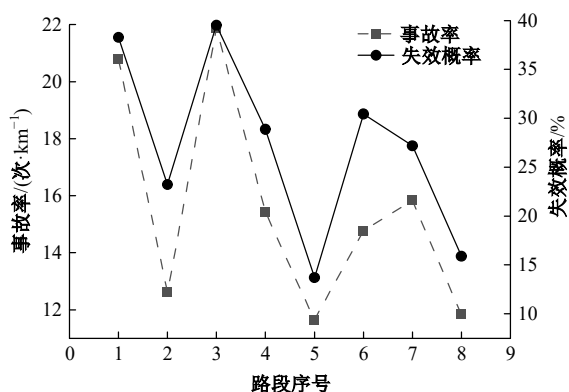


图 4 事故率与停车视距失效概率关系

Fig 4 Relationship between accident rate and failure probability of stopping sight distance

表9 TruckSim主要车辆参数

Table 9 Main vehicle parameters of TruckSim

参数	数值
整车质量/kg	49 000
车长/mm	6 800
车宽/mm	2 500
车高/mm	3 700
发动机最大功率/kW	270
最大扭矩/(N·m ⁻¹)	900
比功率/(kW·t ⁻¹)	5.51

员反应时间与间隙消除时间。道路模型参考实例中云南某高速公路路段,建立双向四车道实例道路模型。

由于规范中停车视距一般按路面潮湿状态计算,路面摩擦因数取2级路面摩擦指数中间值0.53。根据最不利原则,车辆运行速度分别取表8中各区间的车速最大值。ABS滑移率上下门限值设置为0.2与0.15。将仿真制动距离与规范要求值、可靠度模型建议值进行对比,结果见图5。

由图5可知,规范值小于TruckSim仿真实验值,当纵坡为3%、4%、5%时,相对误差分别为13.33%、13.72%、12.25%;可靠度模型建议值略高于仿真实验值,相对误差仅为4.66%、3.92%、3.87%。可见,可靠度模型建议值更接近仿真实验值,计算误差小且结果更加保守,安全性较高。这表明,基于本文所提可靠度研究模型计算得到的货车停车视距值进行高速公路设计与管理,对于降低道路安全风险具有一定的现实意义。

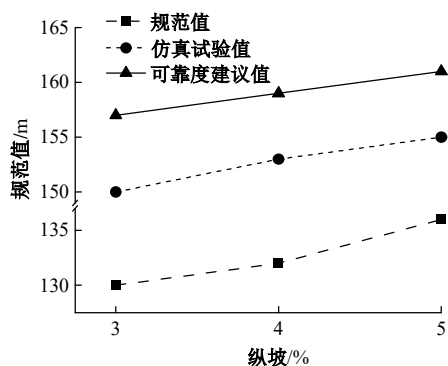


图5 仿真结果及对比

Fig. 5 Simulation results and comparison

5 结论

(1)货车停车视距可靠概率与超载率成反比,与路面摩擦指数成正比,且路面摩擦条件越差,超载率对视距可靠度的影响程度越大。因此,实际中需避免货车超载与路面摩擦条件不良两种不利

因素同时出现产生协同效应。

(2)天气等因素影响下的路面摩擦条件变化对下坡段货车停车视距影响十分显著:2级~5级路面摩擦指数条件下,基于可靠度模型的建议值平均为规范值的1.21倍、1.43倍、1.64倍、3.63倍。

(3)工程实例表明,路段事故率与停车视距失效概率具有较强相关性,停车视距不足易导致交通事故,验证了可靠度设计的有效性。通过TruckSim对货车实际制动过程进行仿真,发现可靠度模型建议值更接近仿真实验值,计算误差更小且更加保守,安全性更高。这表明基于本文所提可靠度研究模型计算得到的停车视距值进行高速公路运营管理,对于降低道路安全风险具有一定的现实意义。

(4)本文提出了考虑ABS影响的停车视距模型,并引入可靠度理论对下坡段货车停车视距计算方法进行了改进。但在对高速公路下坡段货车运行速度的调查中,仅调查了华中地区的3条高速公路;货车超载情况的调查仅参考了河南省的调查数据,数据不够全面。在以后的研究中需扩大收集范围,以增强研究结论的可信度。另外,因实际条件与安全因素限制,本文使用仿真手段对设计速度为80 km/h的实例路段进行了验证,未能开展实车验证。后续研究将以此为方向,补充更准确、更符合实际的道路实车试验,进一步验证模型的有效性。

参考文献:

- [1] 李硕, 马玉坤, 韩晖, 等. 山区高速公路货车事故严重程度致因及随机参数分析[J]. 公路交通科技, 2023, 40(4): 228-236.
Li Shuo, Ma Yu-kun, Han Hui, et al. Analysis of causes and random parameters of truck accident severity on mountainous highways[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40(4): 228-236.
- [2] 程国柱, 程瑞, 徐亮, 等. 基于乘员伤害分析的公路路侧事故风险评价[J]. 吉林大学学报:工学版, 2021, 51(3): 875-885.
Cheng Guo-zhu, Cheng Rui, Xu Liang, et al. Risk evaluation of highway roadside accidents based on occupant injury analysis[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(3): 875-885.
- [3] Xu Z W, Zhang L, Rong X. Clutter suppression for hypersonic vehicle-borne radar with frequency diverse array[J]. Systems Engineering and Electronics, 2017,

- 28(3): 481-492.
- [4] Qin P P, Chen C C, Guo H L. Analyzing the influence of aggregate properties on stopping distance on truck escape ramps[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2019, 24(3): 323-327.
- [5] 吴善根, 李涛, 林宣财, 等. 基于制动减速度的高速公路停车视距研究[J]. 公路交通科技, 2021, 38(9): 51-59.
- Wu Shan-gen, Li Tao, Lin Xuan-cai, et al. Research on stopping sight distance of highway based on braking deceleration[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(9): 51-59.
- [6] Mavromatis S, Matragos V, Pasiadis P, et al. Vertical clearance assessment of overpassing structures on sag vertical curves[J]. Transportation Research Record, 2022, 2676(8): 376-385.
- [7] Navin F P D. Reliability indices for road geometric design[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1992, 19(5): 760-766.
- [8] Chen Y, Zhu F, Chen W Y, et al. A new stopping sight distance model and fuzzy reliability analysis comparison[J]. IEEE Access, 2022, 10: 69568-69576.
- [9] 盛旭高, 于梦阁, 霍伟. 基于停车视距的强降雨环境下公路车辆制动安全可靠研究[J]. 公路交通科技, 2023, 40(1): 227-235.
- Sheng Xu-gao, Yu Meng-ge, Huo Wei. Research on the safety reliability of highway vehicle braking under heavy rainfall based on parking sight distance[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40(1): 227-235.
- [10] JTG D20—2017 公路路线设计规范[S].
- [11] GB 7258—2017 机动车运行安全技术条件[S].
- [12] 周志立, 徐立友. 汽车ABS原理与结构[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [13] 单慧敏. 多车道高速公路停车视距研究[D]. 西安: 长安大学公路学院, 2020.
- Shan Hui-min. Research on stopping sight distance of multi-lane highway[D]. Xi'an: College of Highway, Chang'an University, 2020.
- [14] JTG B01—2014 公路工程技术标准[S].
- [15] 张驰, 任士鹏, 王博, 等. 长大下坡路段货车运行速度特性及预测[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2022, 50(3): 38-49.
- Zhang Chi, Ren Shi-peng, Wang Bo, et al. Characterization and prediction of truck operating speed on long downhill sections[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(3): 38-49.
- [16] Lenzo B. Vehicle Dynamics[M]. Berlin: Springer International Press, 2022.
- [17] 谢静芳, 吕得宝, 王宝书. 高速公路路面摩擦气象指数预报方法[J]. 气象与环境学报, 2006(6): 18-21.
- Xie Jing-fang, Lyu De-bao, Wang Bao-shu. Forecasting method of meteorological index of highway pavement friction[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2006(6): 18-21.
- [18] 齐聪. 高速公路遇气象灾害情况下交通安全管理方法[D]. 长春: 吉林大学建设工程学院, 2014.
- Qi Cong. Traffic safety management method of highway in case of meteorological disasters[D]. Changchun: College of Construction Engineering, Jilin University, 2014.
- [19] 王元元. 沥青路面抗滑特性与其表面粗糙特性之关系研究[D]. 南京: 东南大学交通学院, 2017.
- Wang Yuan-yuan. Research on the relationship between skid resistance characteristics of asphalt pavement and its surface roughness characteristics[D]. Nanjing: College of Transportation, Southeast University, 2017.
- [20] Kane M, Zhao D, Do M T. Exploring the ageing effect of binder on skid resistance evolution of asphalt pavement[J]. Road Materials and Pavement Design, 2010, 11: 543-557.
- [21] 刘晨阳. 货车超载运输对公路的危害及经济效益影响[D]. 郑州: 河南农业大学机电工程学院, 2016.
- Liu Chen-yang. Hazards of overloading transportation of trucks on highway and the impact of economic benefits[D]. Zhengzhou: College of Mechanical & Electrical Engineering, Henan Agricultural University, 2016.
- [22] 郭梦竹. 基于反应时间的驾驶员疲劳状态监测与预警技术研究[D]. 长春: 吉林大学交通学院, 2017.
- Guo Meng-zhu. Research on driver fatigue state monitoring and warning technology based on reaction time [D]. Changchun: College of Transportation, Jilin University, 2017.
- [23] 潘少猷, 冯浩, 张志勇, 等. 制动协调时间在车速鉴定中的运用[J]. 中国司法鉴定, 2012(6): 88-91.
- Pan Shao-you, Feng Hao, Zhang Zhi-yong, et al. The use of braking coordination time in speed identification[J]. China Judicial Appraisal, 2012(6): 88-91.
- [24] JTG 2120—2020 公路工程结构可靠性设计统一标准[S].
- [25] 吕震宙, 宋述芳, 李璐玮, 等. 结构/机构可靠性设计基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2019.