

允许两辆车驶入的避险车道设置

宋灿灿¹, 朱桂荣², 郭忠印¹

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 云南交投集团云岭建设有限公司, 云南 昆明 650224)

摘要: 针对允许两辆车驶入的避险车道(TER), 将先后驶入制动床的两辆车的停靠位置抽象为相互独立事件, 建立了两辆车均能成功驶入避险车道的概率模型. 基于仿真数据的研究结果表明: 主线为直线时两辆车成功驶入避险车道的概率高于主线为平曲线时; 即使主线为直线, 制动床宽度为车辆宽度的 5 倍, 两辆车均能成功驶入制动床的概率也不超过 15%, 这说明仅通过拓宽制动床宽度而不设置满足长度要求的引道, 仍不能保证第二辆车成功驶入制动床.

关键词: 道路工程; 避险车道(TER); 概率模型; 驾驶仿真; 两辆车驶入; 引道

中图分类号: U491

文献标志码: A

Establishment of Truck Escape Ramp Allowing Two Vehicles Entering

SONG Cancan¹, ZHU Guirong², GUO Zhongyin¹

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. YCIC Group Highway Operations & Management Co., Ltd., Kunming 650224, China)

Abstract: For truck escape ramp (TER) allowing two vehicles to enter, we abstract the stopping positions of the two vehicles that have entered TER one after another as independent events, and establish a probabilistic model that both vehicles can successfully enter TER. The results based on simulation data show that: when the mainline is straight, the probability that the two vehicles successfully enter TER is higher than when the mainline is curved. Even if the mainline is straight and the arrest bed width is 5 times of the vehicle width, the probability of the two vehicles successfully entering TER is still no more than 15%. It indicates that it is impossible to ensure the second vehicle entering TER successfully by only widening the width of the arrest bed without setting the required length of approach road.

Key words: road engineering; truck escape ramp (TER);

probability model; driving simulation; two vehicles entering; approach road

避险车道是应对长大纵坡路段货车刹车失灵的最后一道防线, 也是有效的工程措施之一. 在货车比例较高或交通流量较大的高速公路上, 设置允许两辆车驶入的避险车道是非常必要的.

国内外很多学者研究了允许两辆车驶入的避险车道. 在美国, 修建避险车道的 25 个州中, 8 个州发生了多车驶入避险车道的情况^[1]. 新西兰的建设规则^[2]和加利福尼亚州的设计指南^[3]中均建议采用 7.9 m 的制动床设计宽度. 胡艺馨^[4]指出, 考虑到两辆车同时自救的避险需求, 制动床宽度最小值取 8 m. 赵含等^[5]指出, 避险车道的宽度应以能够充分满足短时间内使用避险车道的车辆之间不产生二次事故为标准, 根据设计经验, 制动床合理的宽度应在 4.5~6.0 m. 杨永占等^[6]通过对 71 起失控车辆驶入避险车道的横向位置统计得到, 失控车辆驶入制动床后与左侧硬路肩的横向净距为 1.5~6.0 m, 制动坡道宽度建议取值范围为 7.5~12.0 m. 王磊^[7]提出, 对于应保证两辆及以上汽车安全驶入的特殊路段, 避险车道制动床宽度应控制在 8~12 m. 刘唐志等^[8]指出, 由于长下坡货车失事概率较高, 在较短的时间段内可能有更多的车辆使用避险车道, 因此避险车道制动床宽度最小值应为 8 m. 朱启合等^[9]提出, 考虑停放两辆或更多车驶入时, 避险车道的宽度宜为 9.2~12.2 m. 张华^[10]提出, 对于需要停放两辆或更多车辆的避险车道, 理想宽度应为 8~12 m.

我国《公路路线设计规范》^[11]规定制动床宽度不应小于 4.5 m. 《新理念公路设计指南》^[12]规定, 避险车道宽度应足以容纳一辆以上失控车辆和一辆服务车辆, 制动床和服务车道的总宽度不宜小于 8 m.

美国 AASHTO(American Association of State

收稿日期: 2018-05-01

基金项目: 贵州省交通厅科技项目(2014-122-008); 山西省交通厅科技项目(2014-1-18)

第一作者: 宋灿灿(1988—), 女, 工学博士, 主要研究方向为道路安全与环境. E-mail: 77conshir@tongji.edu.cn

Highway and Transportation Officials)规定,允许两辆车驶入的制动床宽度不低于7.9 m^[13].对109条制动床宽度的统计发现,按照美国标准,37%的制动床允许两辆车驶入.我国较多的避险车道考虑了两辆车驶入的工况.

国内外学者并未对允许两辆车先后驶入的避险车道的引道长度进行专项研究.美国高速公路联邦管理局要求引道长度大于305 m^[14],张翱东^[15]、孙传夏^[16]、宋灿灿等^[17]提出引道长度至少达到9、4、6 s设计行程,但并未限定应用于何种横断面宽度.对于允许两辆车先后驶入的避险车道,后车在驶入过程中不仅要判断避险车道的位置,还要判断前车的位置,为避免二次事故,因此需要更长的引道长度.

对于允许两辆车驶入的避险车道,由于我国缺少相关的标准规范,实际应用中出现两种典型的形式:引道长度过短的短粗型避险车道与引道长度较长的长瘦型避险车道.短粗型避险车道的典型形式是无引道段,而制动床宽度达到12 m及以上,最大宽度为16 m.

本文通过理论建模,研究短粗型避险车道设置的合理性.

1 模型抽象

根据避险车道的制动原理,失控车辆驶入制动床后无法调整方向^[18],因此驾驶员仅能在引道进行行驶方向的调整.避险车道与主线的夹角一般为5°至10°,只有当车辆驶入引道后,驾驶员才能完全看清避险车道的全貌,并做出横向行驶位置的调整.

对于允许两辆车先后驶入的避险车道,后车在主线上行驶时,限于横向与纵向的位置差异,驾驶员难以准确辨别先驶入避险车道车辆的横向停驶位置,即后车只有驶入避险车道引道后,才能完全看清先驶入车辆的停驶位置,后车驾驶员根据前车的停驶位置做出路径的选择,如图1所示.

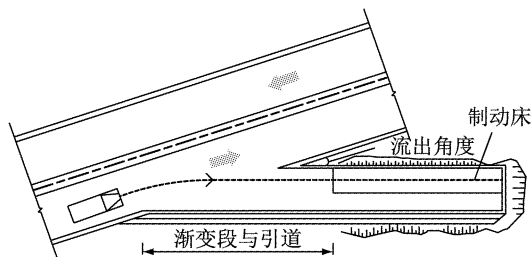


图1 失控车辆驶入避险车道示意图

Fig.1 Diagram of out of control vehicle entering truck escape ramp

通过以上分析可知,当避险车道的渐变段与引道的长度过短时,后车驾驶员没有足够的时间获取前车的位置信息,或有时间获取前车的信息,但缺乏足够的时间进行车辆行驶位置与方向的调整,此时前车、后车在制动床内停驶位置的横向分布可以看作相互独立事件,认为后车的停驶位置不受前车停驶位置的影响.反之,若渐变段与引道的长度足够长,则前车的停驶位置被后车驾驶员获取,并做出相应的横向停驶位置的调整,则前车、后车在制动床上的横向停驶位置为相互影响的连续事件.

2 模型建立

根据模型假设,对于短粗型避险车道,两辆车先后驶入避险车道可作为相互独立事件.根据第一辆车的停驶位置,第二辆车可以成功驶入避险车道的概率分布分为三种情形.

2.1 前车距离左侧护栏较近

如图2所示, a 为制动床左侧护栏与 X 轴起点的距离, l 为失控车辆两侧轮胎外边缘间距, b 为相邻两辆车轮胎外边缘距离,制动床宽度为9.0 m.当第一辆车轮胎外边缘与 X 轴起点的距离 L 在 $(a+l+b)$ 以内时,第二辆车只有驶入制动床右侧才能避免与第一辆车相撞并且成功地停驶在制动床内.因此,两辆车能成功驶入避险车道的概率

$$P_1 = P(X < x)P((x+l+b) < X < (9.0+a-l)), \\ x \in [a, a+l+b] \quad (1)$$

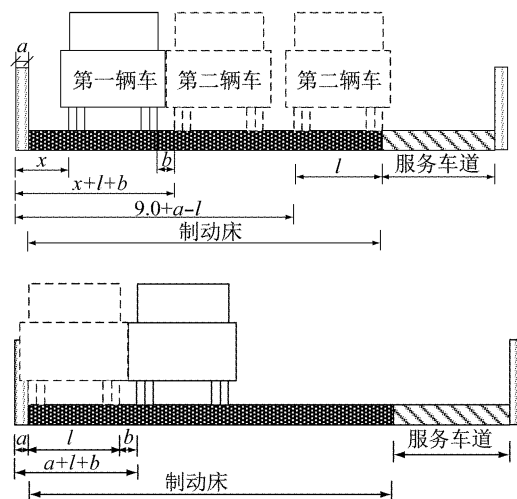


图2 前车靠左侧护栏的停驶位置

Fig.2 Stop position of the first vehicle next to left barriers

2.2 前车靠近服务车道

当第一辆车轮胎外边缘与 X 轴起点的距离为

$(9.0+a-2l-b) \leq L \leq (9.0+a-l)$ 时, 第二辆车只有停驶在制动床左侧才可成功驶入制动床, 如图 3 所示. 因此, 两辆车成功驶入避险车道的概率

$$P_2 = P(X > x)P(a < X < (x-l-b)), \quad x \in [9.0+a-2l-b, 9.0+a-l] \quad (2)$$

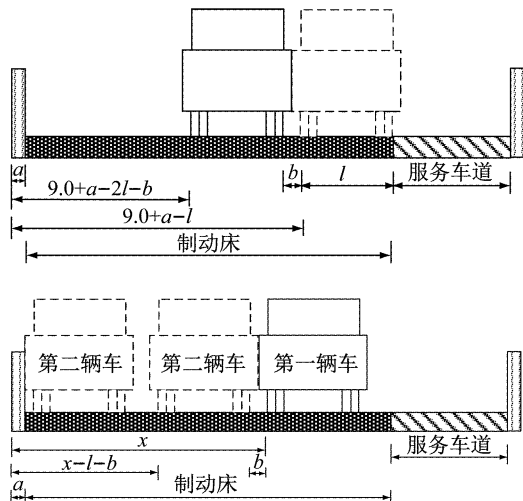


图 3 前车靠近服务车道的停驶位置

Fig.3 Stop position of the first vehicle next to service lane

$P =$

$$\begin{cases} P(X < x)P((x+l+b) < X < (9.0+a-l)), & x \in [a, a+l+b] \\ P((a+l+b) \leq X < x)(P(a < X < (x-l-b)) + P((x+l+b) < X < (9.0+a-l))), & \\ & x \in [a+l+b, 9.0+a-2l-b] \\ P(X > x)P(a < X < (x-l-b)), & x \in [9.0+a-2l-b, 9.0+a-l] \end{cases} \quad (4)$$

根据式(4)的边界条件, 车辆轮距在 2.9 m(车宽 3.0 m)以内时, 模型有实际意义. 对于任意宽度的车辆, 在第一辆车成功驶入避险车道的条件下, 第二辆车能够成功驶入避险车道的概率

$$P_e = \int_a^{(9.0+a-l)} P dx \quad (5)$$

因此, 若计算短粗型避险车道上第二辆车能够成功驶入的概率, 需知道车辆驶入避险车道的横向分布概率.

3 横向分布概率建立

采用 UC Winroad 驾驶模拟仿真平台, 获取了驾驶员先后 900 次驶入避险车道的横向分布数据. 实验中, 制动床宽为 9.0 m, 服务车道宽为 3.2 m, 制动床位于服务车道左侧. 设置避险车道的主线线形, 包括直线与平曲线, 平曲线半径取 400~1 000 m, 步距取 100 m. 驶入制动床的车速为 90~120 km·h⁻¹, 步距 10 km·h⁻¹. 避险车道的流出角取 5°~30°, 步距取 5°. 共 168 个设置水平.

2.3 车辆停驶于制动床中间

当第一辆车停驶于制动床中间时, $(a+l+b) \leq L \leq (9.0+a-2l-b)$, 第二辆车既可以停驶于第一辆车的左侧, 也可以停驶于制动床的右侧, 如图 4 所示. 因此, 两辆车成功驶入避险车道的概率

$$P_3 = P((a+l+b) \leq X < x)(P(a < X < (x-l-b)) + P((x+l+b) < X < (9.0+a-l))), \quad x \in [a+l+b, 9.0+a-2l-b] \quad (3)$$

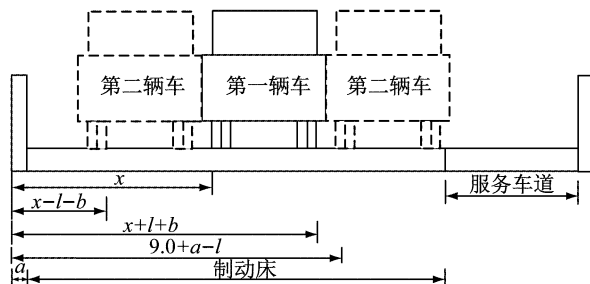


图 4 前车在制动床中间的停驶位置

Fig.4 Stop position at the middle of arrest bed

综上所述, 在假设两辆车先后驶入避险车道的过程完全独立的前提下, 两辆车均能成功驶入避险车道的概率

实验拖挂车宽 2.5 m(包含后视镜)、长 12.0 m, 车轮外距 2.4 m, 如图 5 所示. 通过车辆轮胎外边缘距道路左侧护栏的最小距离判断车辆停驶位置. 根据避险车道的横断面组成(见图 5, 护栏(0.18 m)+路缘石(0.2 m)+制动床(9.0 m)+服务车道(3.2 m)+路缘石(0.2 m)+护栏(0.18 m)), 车辆停驶于制动床的范围为 [0.38, 6.98] m, 车辆停驶于制动床与服务车道的范围为 [6.98, 9.38] m, 车辆停驶于服务车道的范围为 [9.38, 10.18] m.

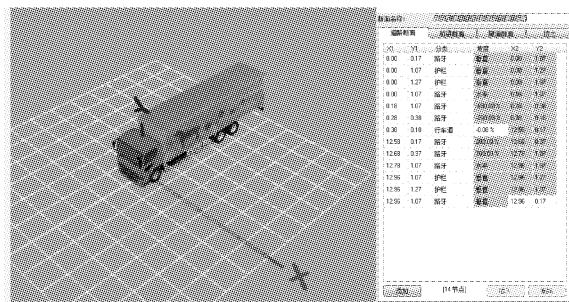


图 5 驾驶模拟实验车与道路模型

Fig.5 Experimental vehicle and road model of driving simulation

根据实验设计,驶入车速、主线线形与流出角均可能对车辆停驶位置的概率分布产生影响,因此采用多因素方差分析确定影响因素。多因素方差分析需要满足正态性、方差齐性和协方差球形性三个使用条件。通过夏皮罗-威尔克方法对数据的正态性检验得出 $P>0.05$,数据服从正态分布。通过方差齐性检验发现 $P<0.01$,各水平方差不齐。因此,多重事后检验时选择两个组方差不等的 Dunnett C 检验方法。球形性检验发现,除驶入车速的 $P=0.077>0.05$,流出角、主线线形与三者之间的交互作用项均不满足球形性假设检验。

驶入车速的样本协方差服从球形性假设,因此适合一元方差分析;流出角、主线线形样本协方差不服从球形性假设,因此采用 GG(Greenhouse-Geisser Epsilon)校正来检验结果。个体内部变异部分的计算结果显示,主线线形对车辆停驶的横向位置有显著影响($P=0.01<0.05$),驶入车速、流出角及三者之间的交互作用对车辆的停驶位置不存在显著影响。不同主线线形的对比发现,主线线形为直线与平曲线时车辆的停驶位置存在显著差异,不同平曲线半径的停驶位置差异不明显。因此,需根据不同的平曲线半径建立车辆横向位置的概率分布函数。

对不同平曲线半径车辆停驶位置进行统计,如

表2 直线和不同平曲线半径下累积频率曲线拟合检验

Tab.2 Fitting test of cumulative frequency curve under straight line and different circular curve radii

半径/m	拟合曲线	R^2	χ^2	n	$\chi^2_{0.05}(n)$	结论
400	$P(X<x)=0.98-\frac{0.98}{1+e^{\frac{x-5.90}{0.37}}}$	0.997 54	46.01	38	53.384	符合
500	$P(X<x)=1.00-\frac{1}{1+e^{\frac{x-5.86}{0.49}}}$	0.998 46	45.45	61	80.232	符合
600	$P(X<x)=1.00-\frac{1}{1+e^{\frac{x-5.66}{0.44}}}$	0.999 34	45.33	45	61.656	符合
700	$P(X<x)=1.00-\frac{1}{1+e^{\frac{x-5.53}{0.43}}}$	0.999 32	46.73	42	58.124	符合
800	$P(X<x)=1.00-\frac{1}{1+e^{\frac{x-5.86}{0.49}}}$	0.999 45	125.26	32	46.194	不符合
900	$P(X<x)=1.00-\frac{1}{1+e^{\frac{x-5.56}{0.28}}}$	0.999 65	22.88	34	44.903	符合
1 000	$P(X<x)=1.00-\frac{1}{1+e^{\frac{x-5.56}{0.28}}}$	0.997 15	4.66	31	41.422	符合
直线	$P(X<x)=1.00-\frac{1}{1+e^{\frac{x-5.63}{0.62}}}$	0.998 75	9.07	77	98.484	符合

4 结果分析

限于函数的复杂性,将累积频率拟合曲线代入模型后,采用 Matlab 软件对函数进行近似计算,如图 7 所示。由图 7 可知,无论主线线形采用何种参数

表 1 所示。主线线形为直线与平曲线半径不低于 700 m 时的停驶位置平均值相同,与平曲线半径低于 700 m 时的停驶位置平均值的差异也不大。主线线形为直线时与平曲线半径为 400 m 时的离散度基本一致,均比其他平曲线半径对应的离散度大。不同条件下变异系数差异明显,主线线形为直线时与平曲线半径不大于 600 m 时的变异系数接近,平曲线半径介于 700 m 至 1 000 m 时的平曲线变异系数明显低于主线线形为直线时。

表1 直线和不同平曲线半径下停驶位置统计

Tab.1 Statistics on stopping position under straight line and different circular curve radii

统计值	直线和不同平曲线半径下停驶位置/m							
	直线	1 000 m	900 m	800 m	700 m	600 m	500 m	400 m
平均值	5.7	5.6	5.6	5.6	5.7	5.9	6.0	5.9
标准差	1.2	0.5	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	1.1
中位数	5.6	5.6	5.6	5.5	5.6	5.8	5.9	5.8
最小值	2.9	4.4	2.5	2.3	3.7	2.4	3.7	3.4
最大值	9.9	7.1	7.6	8.4	8.8	8.3	9.5	10.4
变异系数	1.48	0.25	0.43	0.70	0.65	0.86	0.80	1.12

对不同平曲线半径,通过 Boltamann 曲线拟合失控车辆在制动床内的横向分布函数,如图 6 所示。通过卡方检验来检验曲线的拟合优度,如表 2 所示。除半径 800 m 的平曲线外,其他条件下失控车辆横向停驶位置的累积频率曲线均符合 Boltamann 曲线。

设置,第二辆车驶入避险车道的成功概率均呈双峰曲面变化,这与实际相符,即第一辆车停在制动床一侧时,第二辆车成功驶入制动床的概率提高,而第一辆车停在制动床中间时,第二辆车成功驶入制动床的概率降低。第一辆车停放于制动床外侧时,第二辆车成功驶入制动床的概率最高。

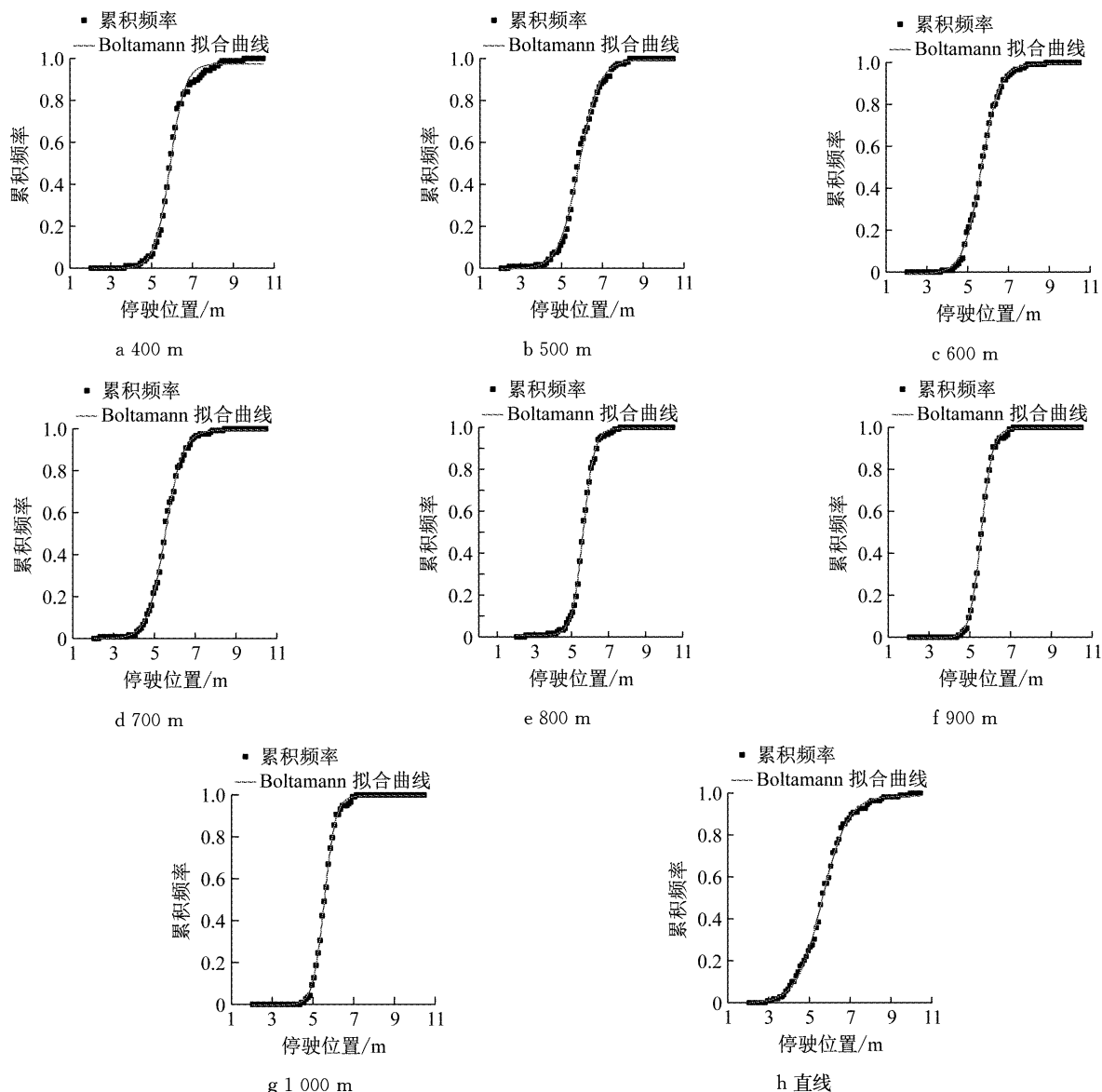


图 6 直线和不同平曲线半径下车辆横向停驶位置累积频率拟合曲线

Fig.6 Cumulative frequency fitting curve of vehicle transverse stopping position under straight line and different circular curve radii

对不同车辆宽度条件下第二辆车能够成功驶入避险车道的概率求积分,即可得到多次不同车辆成功驶入避险车道的概率,如图 8 所示.随着平曲线半径的增大,车辆成功驶入避险车道的概率整体上呈增大的趋势;随着车辆宽度的增大,车辆成功驶入避险车道的概率整体上呈减小的趋势.对比主线线形为直线的路段与平曲线的路段,主线线形为直线时车辆成功驶入避险车道的概率明显高于主线线形为平曲线时,但是通过概率绝对值可以看到,即使是在主线线形为直线的条件下,车辆成功驶入避险车道的概率也较低.横向比较可以看到,当制动床宽度为 9.0 m、车宽为 1.8 m 时,制动床宽度取值为车宽的 5 倍,车辆成功驶入制动床的概率仍然不超过 15%,

说明仅通过拓宽制动床宽度而不设置满足长度要求的引道,不能保证第二辆车能够成功驶入制动床.

5 结语

针对我国广泛采用的允许两辆车驶入的避险车道的典型形式之一,通过对设置较短或不设置引道以及超宽制动床的避险车道研究发现,允许两辆车先后驶入的避险车道受主线线形的影响显著,并且仅拓宽制动床不能达到有效提高两辆车成功驶入避险车道的目的.

根据制动床原理,驾驶员只有在驶入制动床之前才能调整车辆的行驶方向,因此在允许两辆车先

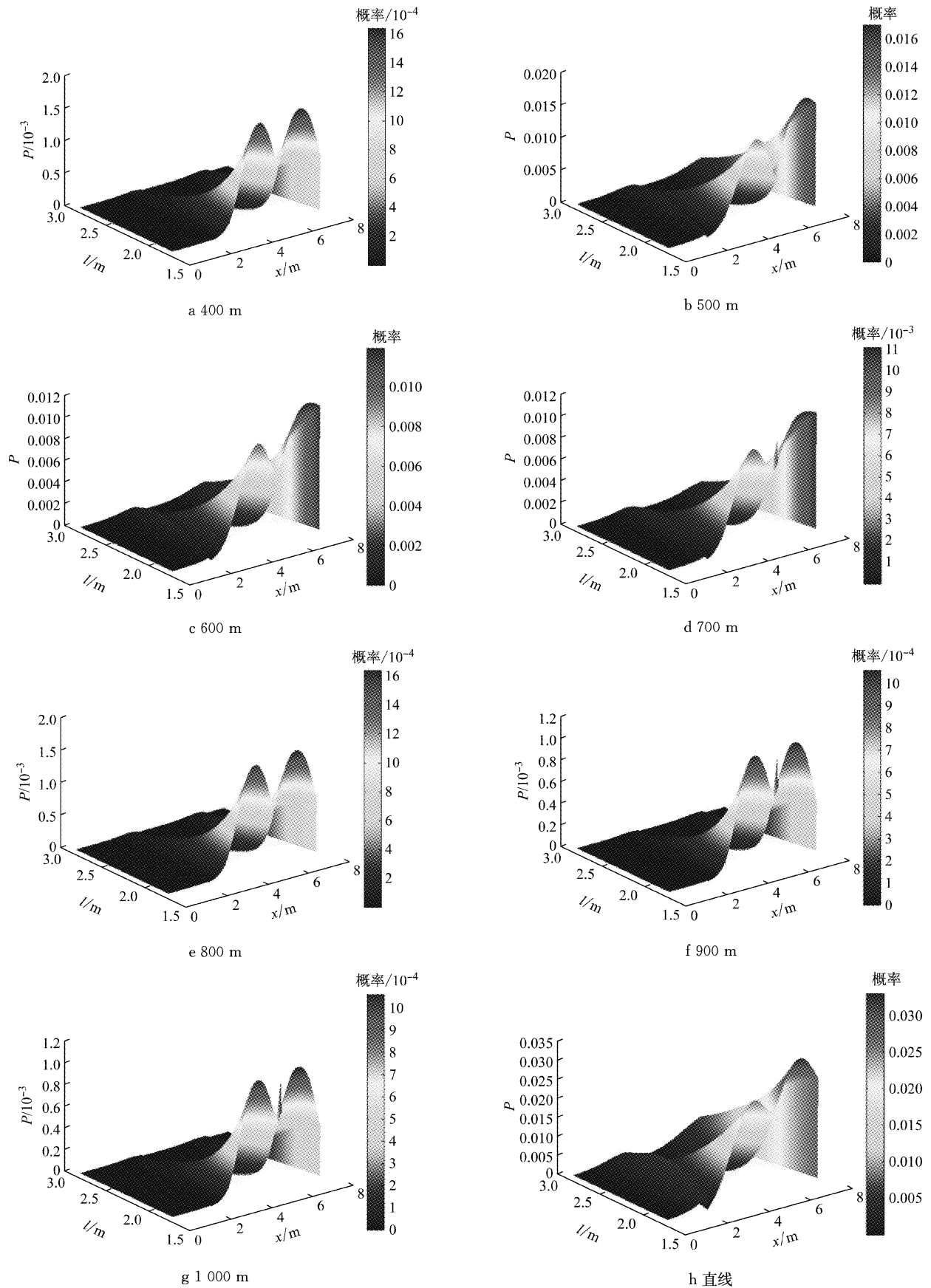


图7 直线和不同平曲线半径下第二辆车能够成功驶入避险车道的概率分布

Fig.7 Probability distribution of the second vehicle successfully entering truck escape ramp under straight line and different circular curve radii

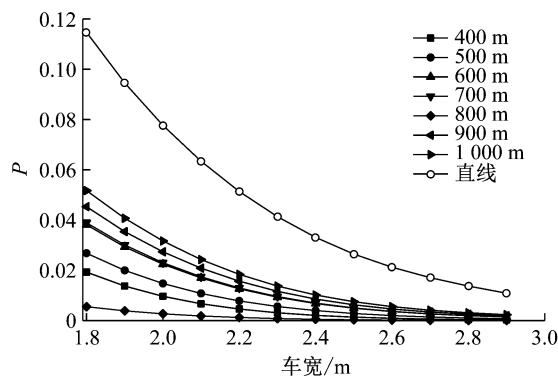


图 8 直线和不同平曲线半径下车辆成功驶入避险车道的概率分布

Fig. 8 Probability distribution of vehicle successfully entering truck escape ramp under straight line and different circular curve radii

后驶入的避险车道上必须设置较长的引道,提供给后车足够的空间以调整车辆的方向。

本文中未给出允许两辆车先后驶入的避险车道引道长度的设置标准,是后续研究的重要方向之一。

参考文献:

- [1] WHITEFORD D K. NCHRP synthesis 178: truck escape ramps [R]. Washington DC: Transportation Research Board, 1992.
- [2] NZ Transport Agency. State highway geometric design manual: draft [S]. Wellington: Transit New Zealand, 2000.
- [3] TYE E J. Design guide for truck escape ramps [S]. Sacramento: California Department of Transportation Division of Traffic Engineering, 1986.
- [4] 胡艺馨. 普通国省干道避险车道设置技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
HU Yixin. Research on setting techniques of truck escape ramp for general national and provincial highway[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.
- [5] 赵含, 高洪如, 李晓辉. 浅谈上坡坡床式避险车道设计方法与内容[J]. 西南公路, 2016(3): 245.
ZHAO Han, GAO Hongru, LI Xiaohui. Research on the design method and contents of uphill slope bed truck escape ramp [J]. Southwest Highway, 2016(3): 245.
- [6] 杨永占, 马亮, 荆坤. 山区高速公路长下坡避险车道线形参数研究[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2015, 11(7): 120.
YANG Yongzhan, MA Liang, JING Kun. Alignment design of the truck escape ramp in the longitudinal steep slope of mountainous highway [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development: Technology, 2015, 11(7): 120.
- [7] 王磊. 山区高速公路避险车道设计与分析[J]. 北方交通, 2015(10): 106.
WANG Lei. The design and analysis of emergency escape ramp in mountain highways [J]. Northern Traffic, 2015(10): 106.
- [8] 刘唐志, 郭鑫, 徐阳, 等. 高速公路避险车道结构设计参数优化研究: 以仁赤高速为例[J]. 公路工程, 2014, 39(3): 94.
LIU Tangzhi, GUO Xin, XU Yang, et al. Research on structural design parameters of truck escape ramps of expressway: illustrated by the example of Renchi expressway [J]. Highway Engineering, 2014, 39(3): 94.
- [9] 朱启合, 张鹏展. 探索山区高速公路避险车道设计[J]. 江西建材, 2013(5): 231.
ZHU Qihe, ZHANG Pengzhan. Exploring the safeway design of highways in mountainous areas [J]. Jiangxi Jiancai, 2013(5): 231.
- [10] 张华. 连续长大下坡路段避险车道设计探讨[J]. 公路交通技术, 2013(4): 134.
ZHANG Hua. Probe into design of truck escape ramps at long and steep downhill sections [J]. Technology of Highway and Transport, 2013(4): 134.
- [11] 中交第一公路勘察设计研究院有限公司. JTG D20—2017 公路路线设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.
CCCC First Highway Consultants Co., Ltd. JTG D20—2017 Design specification for highway alignment[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2017.
- [12] 中华人民共和国交通部. 新理念公路设计指南: 2005 版[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
Ministry of Communications of the People's Republic of China. Highway design guidelines under flexibility: 2005 [S]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [13] AASHTO. A policy on geometric design of highways and streets (green book) [S]. Washington DC: American Association of State Highway Transportation Officials, 2011.
- [14] WILLIAMS E C, Jr. Emergency escape ramps for runaway heavy vehicles: final report No. FHWA-TS-79-201 [R]. Washington DC: Federal Highway Administration, 1979.
- [15] 张翱东. 避险车道常见事故与设计缺陷的原因分析[J]. 甘肃科技纵横, 2013, 42(2): 74.
ZHANG Aodong. Cause analysis of the common accidents occurred in the truck escape ramp and design defects [J]. Scientific & Technical Information of Gansu, 2013, 42(2): 74.
- [16] 孙传夏. 避险车道设置的研究[J]. 交通标准化, 2008(6): 159.
SUN Chuanxia. Research on emergency lane layout [J]. Communications Standardization, 2008(6): 159.
- [17] 宋灿灿, 郭忠印, 蔺琳. 紧急避险车道驶出角度及引道长度设置[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2016(4): 587.
SONG Cancan, GUO Zhongyin, LIN Lin. Departure angle and approach length of truck escape ramp [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2016(4): 587.
- [18] 孟志豪. 山区高速公路避险车道设计方法[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2016, 12(5): 304.
MENG Zhihao. Design method of truck escape ramp for expressway in mountainous area [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development: Technology, 2016, 12(5): 304.