DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2025.06.029 文章编号:1671-2579(2025)06-0254-07

山区公路夜间视觉空间提升评估方法研究

赵岩[1,2],陈燕莉[1],陈嘉乐[1]
(1.西安公路研究院有限公司,陕西 西安 710065;2.陕西交控绿科环保有限公司,陕西 西安 710100)

摘要:针对山区公路夜间行车存在的视线诱导差、视野窄和视距短的问题,该文提出了适用于山区公路夜间行车的视觉空间提升评估方法。通过整合主动、被动交通安全设施,提出了适应山区公路夜间环境的视觉空间提升策略;基于联合仿真构建了视觉空间多维评估指标。以秦岭山区某干线公路为例,从视域拓展和行车安全提升两个角度验证了策略效果。结果表明:提出的视觉空间提升措施能够显著增加有效视距,提高行车安全性,尤其是在复杂弯道、纵坡较大的坡道等高风险路段,可有效降低交通事故风险。

关键词:交通工程;山区公路;夜间视觉空间;交通安全设施;行车安全
中图分类号:U491 **文献标志码:**A

Evaluation Method for Nighttime Visual Space Improvement on Mountain Roads

ZHAO Yan[1,2], CHEN Yanli[1], CHEN Jiale[1]
(1.Xi'an Highway Research Institute Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710065, China; 2.Shaanxi Transportation Holding Green Science and Environmental Protection Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710100, China)

Abstract: To address issues such as poor visual guidance, narrow field of view, and short sight distance during nighttime driving on mountain roads, this study proposed a visual space enhancement evaluation method applicable to mountainous roads at night. By integrating active and passive traffic safety facilities, a visual space enhancement strategy adapted to the nighttime environment of mountain roads was proposed. A multidimensional evaluation indicator for visual space was established based on co-simulation. The effectiveness of the strategy was verified from the perspectives of visual space expansion and driving safety improvement by taking a trunk highway in the Qinling mountainous region as a case study. The results show that the proposed visual space enhancement measures can significantly increase effective sight distance and improve driving safety, especially on high-risk road sections such as complex curves and steep longitudinal slopes, where they can effectively reduce the risk of traffic accidents.

Keywords: transportation engineering; mountain road; nighttime visual space; traffic safety facility; driving safety

0 引言

在驾驶过程中,驾驶员80%以上的信息获取方式来自视觉[1-2]。与白天相比,夜间事故的主要影响因素在于视觉环境的差异。夜间环境亮度差,诸多交通信息都融入夜色之中,加上人在夜间视力减弱、速度感知迟缓等,均会增加操作失误风险,夜间交通事故率显著高于白天[2]。

国内外对夜间驾驶视觉的研究,多集中于夜间环境条件与驾驶员视觉表现的关系。Easa等[3]指出在直线段光照强度的增加有助于提高驾驶员对交通标志的视认能力,然而在曲线段,过高的光照环境会使视认性变差,甚至产生负作用。然而,这类研究在应用中仍面临局限性,例如难以平衡不同路段和视觉空间对驾驶员识别需求的差异性;程国柱等[4]建立了驾驶员昼夜识别距离与行驶速度、平曲线半径、纵坡的多元关系模型,指出驾驶员夜间识别距离与行驶速度、平曲线半径和纵坡分别呈负线性、正对数和负指数关系。

夜间行车安全的研究主要体现在驾驶行为控制

收稿日期:2024-11-12 **修回日期:**2025-02-27
基金项目:陕西省交通科技项目(编号:15-25K,22-48T)
作者简介:赵岩,男,博士,正高级工程师.E-mail:462814608@qq.com

方面。首先，驾驶行为控制与交通量有直接关联[5-6]，研究夜间驾驶行为时，需要结合实际情况输入准确的交通量；其次，对于驾驶行为与速度，目前学者普遍认为夜间驾驶员难以准确掌握行驶速度，易出现超速等不安全行为[7-8]。约有半数的驾驶员在夜间的驾驶感知速度小于实际速度[9]。程国柱等[10]研究进一步指出驾驶员夜间速度感知与行驶速度、平曲线半径呈正线性、负对数相关，与纵坡无关。此外，学者们还对交叉口[11]、交织区[12]、连续急弯、长大下坡等高风险路段进行了系统的安全评估，以保证行车安全性。

综上所述，提升山区公路夜间视觉空间，可改善路面照明、驾驶视觉，也利于行车安全[13]。本文在现有研究基础上，结合不同路段的特性，提出了基于主、被动交通安全设施并适应不同交通环境的山区公路夜间视觉空间提升策略。从夜间视域扩展和行车安全提升两个角度，建立基于联合仿真的效果评估模型。以秦岭山区某干线公路为例，对该模型进行验证，可为夜间行车安全提供可靠的技术支持。

1　山区公路夜间视觉空间设计

山区公路夜间驾驶时，视线不良是引发交通事故的重要原因。据统计，18:00—24:00是交通事故的高发期，其中23:00—24:00是山区公路交通事故造成结果最严重时段[14]。基于此，本文将治理夜间交通事故，改善道路安全性能，即通过提升视觉空间，改善夜间交通安全。

夜间交通事故的发生，很大程度上是视觉环境造成的，主要是视线诱导差、视野窄、视距短，本文将其归纳为“3视”问题。该问题是交通系统中“人”的视觉角度以及主动防护安全措施缺乏造成的。因此，考虑山区公路夜间驾驶安全问题时，应重点考虑解决“3视”问题。采用必要的视觉空间提升策略，如：增加夜间照明设施、提高路面亮度、增加夜间视线诱导等，对解决山区公路夜间交通事故具有现实意义。针对不同道路视觉空间的提升策略见表1。

2　基于联合仿真的安全评估

2.1　仿真软件与流程

本文采用VISSIM进行道路交通仿真，并通过替代安全评估模型（Surrogate Safety Assessment Model，SSAM）（图1）分析轨迹数据，评估交通安全隐患（图2）。首先，在VISSIM中建立道路模型，模拟特定交通条件下的车辆运行状态，生成轨迹数据

表1　不同道路视觉空间提升策略

Table 1　Visual space enhancement strategies for different road types

道路交通情况			夜间潜在风险	视觉空间提升策略
路段	平曲线	长直线	夜间单调线形，易于引发驾驶员注意力衰减	① 设置自发光道路标线，警醒驾驶员并提示道路轮廓；② 增加照明设施，使驾驶员能够更清楚地观察路面情况
		弯道	识认能力、判断能力变差，不能及时发现弯道，不能判别曲率	① 发光/反光警告标志；② 设置发光、反光标线或轮廓标、诱导标、壁灯、灯带、道钉等，主动提供道路轮廓；③ 增加照明设施，使驾驶员能够更清楚地观察路面情况
	纵曲线	坡道	识认能力、判断能力变差，不能及时发现坡道，造成车速过快	① 设置发光/反光交通标志，使驾驶员提前发现前方为坡道而采取相应行动；② 主动提供道路轮廓，避免由于车前灯照射范围有限而引起的视距不足；③ 增加照明设施，使驾驶员能够更清楚地观察路面情况
	横断面	无中央分隔带	眩目	设置防眩目隔离措施，减少驾驶员眩目
路口		村镇	由于识认能力、判断能力变差，不能及时发现冲突车辆、行人	① 设置发光警告标志、自发光地面标线，使驾驶员提前发现前方过村镇路段而减速行驶；② 设置反光人行横道或彩色路面，使驾驶员准确观察到其他车辆、行人通行轨迹；③ 增加照明设施，使驾驶员能够更清楚地观察路面情况
特殊结构物		隧道	由于明、暗变化，不能及时发现前方车辆	调节隧道出入口照明，使之与外界环境相适应
部分交通工程设施		护栏	由于识认能力、判断能力变差，不易确定横向距离	在护栏上设置各类发光设施，明确护栏走向、位置

文件。其次，利用SSAM分析轨迹数据，识别潜在的交通安全问题，从而实现有效的安全性评估。

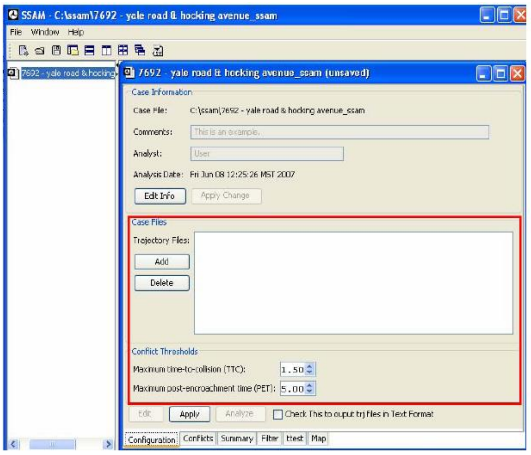

图1 SSAM分析界面

Figure 1 SSAM analysis interface

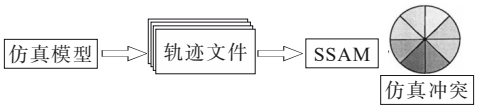

图2 仿真流程

Figure 2 Simulation workflow

2.1.1 VISSIM道路仿真

仿真道路模型按照试验路段平纵曲线、车道宽度等参数建立，车辆选择大型货车、小型车等类型。驾驶员模型采用基于心理生理理论的Wiedemann-99模型。车辆单元在仿真中处于以下4种情形：自由驾驶、变道、跟车及制动。

由不同的道路线形情况赋予车辆一定范围内的期望车速分布，车辆在道路运行时，车速将不断变化逐渐接近期望车速。通过驾驶员视域范围，确定不同的减速起点。因此，改善前、后道路具有不同的能见度范围，车辆开始减速的位置也是不同的，导致运行中的制动减速度存在明显差异。

2.1.2 SSAM安全行为分析

SSAM软件是一款由美国联邦公路管理局(FHWA)开发的交通安全分析工具。它通过分析微观交通仿真模型的数据，评估交通场景中的潜在冲突和安全风险，无需等待实际事故的发生。SSAM需要基于其他微观交通仿真模型(VISSIM、AIMSUN)输出的轨迹数据，继而进行安全行为的统计分析。

2.1.3 仿真流程

VISSIM与SSAM的联合仿真被广泛应用并证明其有效性[15-18]。本文采用VISSIM输出的轨迹文件作为SSAM输入文件，通过VISSIM建立道路交通模型，仿真改善前、后的交通运行状况，并输出车辆轨迹文件，当SSAM获得车辆运行轨迹后进行分析。通过3次仿真试验后，发现交通安全隐患行为，并取仿真结果均值计为其次数。

2.2 行车安全评估指标

SSAM通过分析车辆轨迹数据，评估行车安全状况。当车辆的运行轨迹在某些关键安全指标上超过设定阈值时，系统会将其识别为潜在的安全隐患行为。通过这种方式，SSAM可以提前检测出可能导致事故的危险动作，为交通安全管理提供有效的参考数据，有助于及时采取预防措施，从而减少事故发生的风险。

仿真中使用的安全指标包括以下几类：

(1) 距碰撞时间T_{TTC}：距离碰撞发生的时间最小值，该估值基于一个给定瞬间的车辆速度与相对位置。如果继续维持当前的速度和行驶方向，将发生碰撞的预期时间差值。

(2) 遭遇时间T_{PET}：前车通过某个位置与后车通过同一位置的时间差最小值，0值表示碰撞发生。

(3) 最大速度V_{max}：车辆车速最大值。

(4) 相对速度V_D：最小T_{TTC}时刻冲突车辆的相对车速，$V_D=\|\boldsymbol{v}_1-\boldsymbol{v}_2\|$，$\boldsymbol{v}_1$，$\boldsymbol{v}_2$为排头车辆和跟随车辆的速度向量。

(5) 减速度a_{DR}：车辆的减速度。

2.3 视域拓展效果分析

设改善前视距为S_1，改善后视距为S_2。改善前视距S_1由车灯最远照射距离与车灯照明直线投射在公路范围内的最远距离共同确定。即：

$$S_1=\min[L_0,Q] \tag{1}$$

式中：L_0为车灯最远照射距离；Q为车灯照明直线投射在公路范围内的最远距离。

在山区公路上，Q通常小于L_0。由式(1)可知：S_1可能取得的最大值为车灯最远照射距离。

光环境改善后的视距S_2，由照明设施夜间识认距离和车辆-照明设施之间的通视距离决定，即：

$$S_2=\min[\varphi(v)L_1,D_1] \tag{2}$$

式中：L_1为静态照明设施夜间识认距离，受到驾驶员处于动态环境的影响，动态识认距离与静态环境下相比较小；D_1为车辆-照明设施之间的通视距离；$\varphi(v)$为缩减比例函数，亦为车速的函数，当车

速为零时，$\varphi(v)$为1；当车速大于零时，$\varphi(v)$为小于1的数。

3　实际案例分析

3.1　案例背景介绍

为了验证山区公路的夜间视觉空间提升评估模型效果，本文以秦岭山区某干线公路为例进行验证。该路段为二级公路，与其他道路平面交叉共计56处，设计线形复杂，常出现连续弯道、急弯等不良平面线形，易发生交通事故。道路设计速度为40 km/h，局部路段设计速度为30 km/h。

3.2　行车安全提升措施

试验路段的桩号为K40＋950～K52＋750。视觉改善方式主要有路侧太阳能道钉、太阳能灯带、太阳能诱导标志、太阳能壁灯、太阳能路灯、太阳能限速标志、夜光路面与自发光标线、太阳能爆闪灯与黄闪灯。此类设施在夜间开启，设置方案如表2所示。

3.3　方案提升效果分析

3.3.1　视域拓展效果

通过建立仿真模型，模拟了车辆在试验路段不同车速下的运行状态，并结合道路的地形信息、视觉空间提升措施与具体设施布局，对不同车速条件下的车辆视认距离进行了量化分析。依据车辆的速度分布计算视认距离，并结合道路的坐标数据得出当前车辆位置与采用设施之间的通视距离，从而确定车辆在试验路段中的视域提升效果。通过对数据的进一步处理，得到了各关键节点的视距平均值，如表3、图3所示。

表2　试验路段夜间视觉空间提升方案

Table 2　Nighttime visual space enhancement scheme for test section

序号	路段桩号		长度/m	路段类型	提升措施
1	K40＋950	K41＋050	100	连续弯道	两侧道钉
2	K41＋150	K41＋600	450	连续弯道	右侧灯带
3	K41＋650	K41＋760	110	急弯	诱导标志
4	K41＋950	K42＋000	50	线形较好路段	夜光路面
5	K42＋100	K42＋200	100	连续弯道	两侧道钉
6	K42＋350	K42＋410	60	连续弯道	道钉
7	K42＋530	K42＋550	20	桥梁	太阳能壁灯
8	K42＋660	K42＋680	20	桥梁	太阳能壁灯
9	K42＋680	K42＋750	70	弯道，村镇入口	爆闪灯
10	K44＋550	K44＋620	70	连续弯道	单侧道钉
11	K45＋700	K45＋920	220	村镇	路灯
12	K46＋960	K47＋120	160	村镇	路灯
13	K47＋120	K47＋210	90	线形较好路段	外侧灯带
14	K48＋450	K48＋720	270	连续弯道	两侧道钉
15	K49＋750	K49＋900	150	线形较好路段	夜光路面＋自发光标线
16	K50＋050	K50＋100	50	急弯	左侧诱导标志
17	K50＋250	K50＋350	100	急弯	左侧诱导标志
18	K50＋600	K50＋700	100	线形较好路段	夜光路面
19	K50＋910	K51＋030	120	连续弯道	外侧灯带
20	K51＋120	K51＋600	480	连续弯道	外侧灯带
21	K51＋700			选择合适位置替换标志板	限速标志
22	K52＋150	K52＋300	150	线形较好路段	自发光标线
23	K51＋950	K51＋975	25	护栏	壁灯
24	K52＋300	K52＋350	50	护栏	壁灯
25	K52＋350	K52＋450	100	线形较好路段	左侧灯带
26	K52＋650	K52＋700	50	线形较好路段	夜光路面
27	K52＋650	K52＋750	100	线形较好路段	自发光标线
28	K52＋300	K52＋350	50	混凝土护栏	壁灯

表3 试验路段夜间视觉空间提升前后视域对比

Table 3 Comparison of visual fields before and after nighttime visual space enhancement on test section

序号	路段桩号		实施前/m	实施后/m	提高比例/%
1	K40+950	K41+050	80	170	113
2	K41+150	K41+600	70	135	93
3	K41+650	K41+760	40	85	113
4	K41+950	K42+000	45	120	167
5	K42+100	K42+200	165	205	24
6	K42+350	K42+410	140	150	7
7	K42+530	K42+550	100	120	20
8	K42+660	K42+680	45	100	122
9	K42+680	K42+750	55	130	136
10	K44+550	K44+620	150	190	27
11	K45+700	K45+920	85	140	65
12	K46+960	K47+120	165	300	82
13	K47+120	K47+210	80	80	0
14	K48+450	K48+720	165	450	173
15	K49+750	K49+900	165	245	48
16	K50+050	K50+100	85	250	194
17	K50+250	K50+350	65	105	62
18	K50+600	K50+700	60	110	83
19	K50+910	K51+030	60	125	108
20	K51+120	K51+600	70	135	93
21	K51+700		150	170	13
22	K52+150	K52+300	165	200	21
23	K51+950	K51+975	165	180	9
24	K52+300	K52+350	165	250	52
25	K52+350	K52+450	165	275	67
26	K52+650	K52+700	165	200	21
27	K52+650	K52+750	165	190	15
28	K52+300	K52+350	165	275	67

表3、图3结果表明：夜间视域构架后，试验路段的视距改善显著。例如，K40+950～K42+000段视距提高了93%～167%，K42+660～K42+750段视距提高了122%～136%，K48+450～K48+720段视距提高了173%。在夜间驾驶环境中，视距的显著提升能够有效拓宽驾驶员的视野，增加信息获取范围，从而大幅度降低夜间驾驶的安全风险，对提高道路安全性具有重要的意义。但也存在区域视距改善效果并不明显的路段，如K42+100～K42+550、K44+550～K47+210等位置。分析原因主要是这些路段受山体和其他障碍物的阻挡，线形指标较差，即使在环境亮度较好的白天，这种遮挡也无法改变。

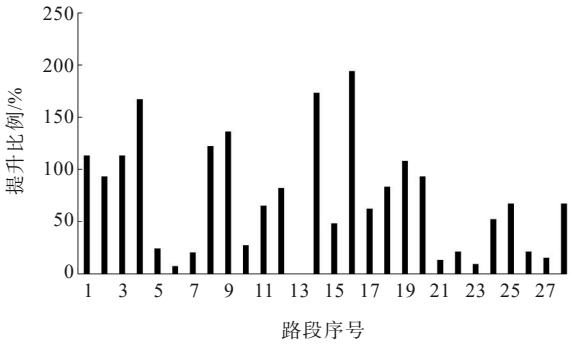

图3 方案实施后各路段视域提升情况

Figure 3 Visual field enhancement across road sections after strategy implementation

总体而言，在具备改善条件的路段上，夜间空间视觉提升方案取得了显著的效果。

3.3.2 行车安全提升效果

通过SSAM仿真分析了视域拓展方案对道路交通安全的影响，重点考察了改善前后潜在交通冲突事件的变化情况，以验证方案的安全性改进效果。本文主要关注了两类高风险潜在事故：① 由于减速距离不足引发的紧急制动事件；② 由于变道操作引发的车辆冲突事件。表4展示了仿真数据的代表性样本，其中包含了距碰撞时间（T_{TTC}）、遭遇时间（T_{PET}）、最大速度（V_{max}）、相对速度（V_D）、减速度（a_{DR}）以及事故类型等多项关键安全指标。通过对这些数据的深入分析，能够精确评估不同路段视域改善对两类潜在事故发生的频率所产生的影响，进而为交通安全提升的量化分析提供坚实的基础。

表4 仿真数据样例

Table 4 Simulation data sample

Min T_{TTC}出现时刻/s	T_{TTC}/s	T_{PET}/s	V_{max}/(m·s^{-1})	V_D/(m·s^{-1})	a_{DR}/(m·s^{-2})	类型
1 195.2	1.4	2.2	3.17	1.00	0.67	紧急制动
1 196.0	1.5	2.4	3.93	1.98	1.40	紧急制动
1 321.6	1.3	1.4	18.06	27.29	0	变道冲突
1 770.0	0	0	11.92	18.73	1.34	变道冲突

根据仿真数据结果，在不同车辆运行速度和道路曲线安全速度的条件下，紧急制动事件的发生频次与减速度的大小显著相关。当车辆的实际行驶速度较高且低于道路的安全速度需求时，为避免发生碰撞，车辆需采取更大的减速度，但这种紧急制动行为使交通环境更为危险。表5展示了不同安全车速

条件下车辆所需的减速度数据，当车速较快而曲线安全车速较低时，减速度明显增大，这表明车辆在急剧减速过程中存在更大的安全隐患。此外，流量条件的变化也对潜在事故的频次产生了重要影响。

表 5　减速度

Table 5　Deceleration values

曲线安全车速/(km·h^{-1})	各行驶车速(km·h^{-1})下的减速度/(m·s^{-2})				
	60	70	80	90	110
20	1.10	1.36	2.20	2.91	4.50
30	0.93	1.33	2.00	2.70	4.30
50	0.40	0.75	1.40	2.10	3.66

为了评估不同流量条件下的安全性变化，分别在 100 pcu/h、400 pcu/h、700 pcu/h 和 1 000 pcu/h 流量下进行了仿真，结果如图 4、5 所示。

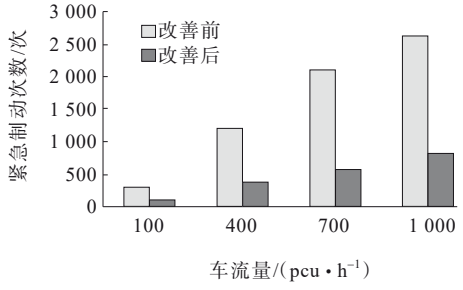

图 4　SSAM 仿真紧急制动次数

Figure 4　Emergency braking frequency in SSAM simulation

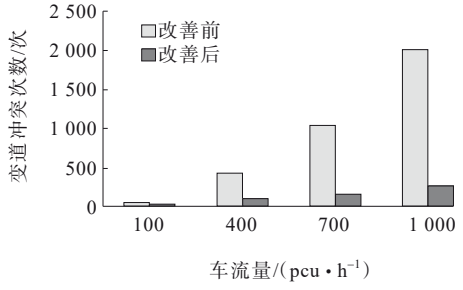

图 5　SSAM 仿真变道冲突次数

Figure 5　Number of lane change conflicts in SSAM simulation

从图 4、5 可以看出：① 视域改善后试验路段的紧急制动事件和变道冲突事件的发生频率均有所降低。这些数据充分证明了夜间空间视觉提升方案有效改善了交通安全，验证了该方案在不同交通流量环境下的适用性；② 在未改善之前，当交通流量较小时，车辆主要表现为紧急制动行为。随着流量增至 400 pcu/h，变道冲突事件开始激增，并且随着车流量的进一步增加，变道冲突发生的频率显著提高。同时，紧急制动行为的发生频率也相应增加，表现出交通风险随着流量上升而加剧的趋势。

车流量的增加导致车辆的总体行驶速度有所减缓。当流量达到 700 pcu/h 时，冲突车辆的平均速度降至 8.89 m/s，比 400 pcu/h 流量条件下的平均速度降低了 0.62 m/s。同时，冲突车辆后方跟随车辆在避险时的平均减速度也有所降低，减小了约 0.20 m/s^2。然而，尽管速度和减速度有所下降，冲突事件的总次数却大幅增加，紧急制动和变道冲突事件均比低流量条件下翻了 1 倍，反映出高流量条件下道路安全风险的显著上升。

在夜间视域空间改善之后，由于夜间驾驶员的可见范围得到显著扩展，使其不再完全依赖于车道的照明区域，即便在偶尔车辆速度较高的情况下也可能出现紧急制动行为，但其发生频次明显低于改善前的情况。这表明夜间视域空间提升方案在警示驾驶员方面发挥了积极作用，减少了潜在的交通冲突事件，尤其是在高流量条件下，这一效果更加显著。通过视域改善，驾驶员能够更早识别道路状况，从而进行适当的操作调整，有效降低潜在交通事故的发生率。上述结果验证了夜间视觉空间提升措施对增强交通安全水平、减少事故风险具有显著的积极作用。

4　结论

本研究提出的夜间视觉空间提升效果评价方法，为山区公路的驾驶安全性提供了有效的评估途径。在交通事故高发时段，该提升方案显著改善驾驶员的视觉感知与安全防护能力，有效优化夜间行车视觉环境。得到以下结论：

(1) 视觉空间的改善效果在不同路段具有明显差异。在地形限制较小的路段，视距提升效果显著，一般大于 60%，使驾驶员能够更早识别路况，并获得充足反应时间；而在地形限制较大的路段，因受地形遮挡影响，视距提升效果较为有限，一般小于 30%。因此，视觉空间提升方案的实施应结合地形条件和道路特征，选择合理的优化措施与设施布局方案，以达到满意的效果。

(2) SSAM 仿真结果显示，夜间视觉空间优化后，试验路段分别在 100 pcu/h、400 pcu/h、700 pcu/h 和 1 000 pcu/h 的交通条件下，紧急制动事件减少了 71%、67%、73%、69%，车辆冲突事件减少了 70%、77%、79%、86%，表明视觉空间的优化对提升驾驶员认知能力和安全驾驶行为具有积极作用。

（3）在后续研究中，将通过对比同一道路路段不同设施布设方案的效果，探讨各类设施的性能差异。同时，结合更多真实道路环境的实测数据和先进仿真软件技术，为复杂道路环境下的夜间安全性能提升提供更可靠的评估方法。

参考文献：

References：

[1] 秦雅琴,李秋谷,谢济铭.驾驶人风险感知研究综述[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2021,46(5):125-138.
QIN Yaqin,LI Qiugu,XIE Jiming.A review of research on hazard perception[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Sciences), 2021, 46(5): 125-138.

[2] 王传连.生理因素对驾驶人行为及风险感知影响研究综述[J].中国安全生产科学技术,2018,14(4):155-159.
WANG Chuanlian. Review of research on effect of physiological factors on behavior and risk perception of drivers[J].Journal of Safety Science and Technology,2018, 14(4):155-159.

[3] EASA S M,REED M J,RUSSO F,et al.Effect of increasing road light luminance on night driving performance of older adults[J]. International Journal of Applied Science, Engineering and Technology,2010,6(1):41-48.

[4] 程国柱,薛长龙,韩娟.高速公路驾驶员昼夜识别距离变化规律[J].西南交通大学学报,2012,47(6):996-1002.
CHENG Guozhu, XUE Changlong, HAN Juan. Changing rule of driver's recognition distance in daytime and nighttime on freeway[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2012,47(6):996-1002.

[5] 宝然,唐琤琤,狄胜德.小交通量农村公路线形诱导标设置研究[J].公路交通科技,2023,40(8):146-153.
BAO Ran, TANG Chengcheng, DI Shengde. Study on the setting of linear guidance signs for rural roads with small traffic volume[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2023,40(8):146-153.

[6] 唐皓,唐忠泽,张驰,等.隧道与主线出口间小净距路段车辆行驶特征分析[J].交通信息与安全,2023,41(4):33-43.
TANG Hao, TANG Zhongze, ZHANG Chi, et al. An analysis of driving behavior on short distance section between tunnel and the exit of main roadway[J].Journal of Transport Information and Safety,2023,41(4):33-43.

[7] YARED T, PATTERSON P, ABDEL ALL E S. Are safety and performance affected by navigation system display size, environmental illumination, and gender when driving in both urban and rural areas? [J]. Accident Analysis & Prevention,2020,142:105585.

[8] BAKER R G V.On the quantum mechanics of optic flow and its application to driving in uncertain environments[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour,1999,2(1):27-53.

[9] HAGLUND M,LARS Å.Speed choice in relation to speed limit and influences from other drivers[J]. Transportation Research Part F:Traffic Psychology and Behaviour,2000,3 (1):39-51.

[10] 程国柱,胡立伟,韩娟.高速公路驾驶员昼夜感知速度变化规律[J].东南大学学报(自然科学版),2012,42(3):547-550.
CHENG Guozhu, HU Liwei, HAN Juan. Variation rule of driver's perception speed on freeway during daytime and nighttime[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition),2012,42(3):547-550.

[11] 武刚,文竞舟,潘俊涛.山区干线公路交叉口安全评价及改善研究[J].公路,2021,66(4):201-207.
WU Gang,WEN Jingzhou,PAN Juntao.Research on safety evaluation and improvement of trunk road intersections in mountainous areas[J].Highway,2021,66(4):201-207.

[12] 王子鸣,李树彬,崔帅.基于交通冲突的主干路交织区特性与安全研究[J].中外公路,2024,44(3):236-245.
WANG Ziming, LI Shubin, CUI Shuai. Characteristics and safety of weaving areas of trunk roads based on traffic conflicts[J].Journal of China & Foreign Highway,2024,44 (3):236-245.

[13] JACKETT M, FRITH W. Quantifying the impact of road lighting on road safety: A New Zealand Study[J]. IATSS Research,2013,36(2):139-145.

[14] 何松柏,郑智,安雅琴,等.道路交通事故时间分布规律[J].军事交通学院学报,2015(1):83-86.
HE Songbai, ZHENG Zhi, AN Yaqin, et al. Study on time distribution law of road traffic accidents[J]. Journal of Military Transportation University,2015(1):83-86.

[15] 张楠,刘彬.基于交通冲突分析的智慧高速隧道主动风险防控方法研究[J].公路,2024,69(6):272-277.
ZHANG Nan,LIU Bin.Research on active risk prevention and control method of smart high-speed tunnel based on traffic conflict analysis[J].Highway,2024,69(6):272-277.

[16] 蔡俊杰,陈为江,潘兵宏,等.城市道路双向左转车道交叉口最小间距研究[J].公路,2021,66(10):67-76.
CAI Junjie,CHEN Weijiang,PAN Binghong,et al.Study of the minimum distance between two-way left-turn lane intersections of urban roads[J]. Highway, 2021, 66(10): 67-76.

[17] 周伟杰.高速公路匝道入口区安全评价研究[J].中外公路,2015,35(4):330-332.
ZHOU Weijie. Study on safety evaluation of expressway ramp entrance area[J]. Journal of China & Foreign Highway,2015,35(4):330-332.

[18] 曾岳凯,周涛,陈亚振.基于仿真的多车道高速公路交通冲突分析[J].中外公路,2023,43(3):270-274.
ZENG Yuekai, ZHOU Tao, CHEN Yazhen. Traffic conflict analysis of multilane expressway based on simulation[J]. Journal of China & Foreign Highway,2023,43(3):270-274.