

高速公路改扩建作业区夜间轮廓标布设研究

李扬帆¹, 田文康^{2,3*}, 余文郡^{2,3}, 周颖^{2,3}

¹广东省高速公路有限公司粤赣河惠扩建工程管理处, 广东 广州

²中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉

³武汉中交交通工程有限责任公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年4月23日; 录用日期: 2026年5月13日; 发布日期: 2026年5月22日

摘要

针对高速公路改扩建作业区夜间轮廓标视线诱导效果不均衡的问题, 本文以沈海国家高速公路(G15)开阳段“四改八”改扩建工程为依托, 建立了基于Lucidshape的夜间近光灯照度仿真模型, 系统分析了半幅双向四车道保通条件下行车道与超车道两侧的照度分布特征。研究发现, 受近光灯截止线不对称光形影响, 右/左照度比随纵向距离增大而显著增大, 行车道96 m处达13.85, 超车道达24.71。基于逆反射系数理论、双线性插值计算及面积比参数敏感性分析, 提出了差异化布设方案: 左侧采用V类黄色反光膜(面积比1.6), 右侧采用IV类白色反光膜(间距8 m)。仿真验证表明, 改善后行车道最大亮度比由13.85降至4.08 (降幅70.5%), 超车道由24.71降至8.03 (降幅67.5%)。工程经济性评价表明, 方案效益成本比BCR = 4.58, 具有显著的经济可行性。

关键词

夜间交通安全, 高速公路改扩建, 轮廓标布设, 照度仿真, 逆反射系数, 视觉亮度均衡, 效益成本比

Study on Nighttime Delineator Layout in Highway Reconstruction and Expansion Work Area

Yangfan Li¹, Wenkang Tian^{2,3*}, Wenjun Yu^{2,3}, Ying Zhou^{2,3}

¹Yue-Gan Hehui Expansion Project Management Office, Guangdong Expressway Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

²CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd., Wuhan Hubei

³Wuhan CCCC Transportation Engineering Co., Ltd., Wuhan Hubei

Received: April 23, 2026; accepted: May 13, 2026; published: May 22, 2026

*通讯作者。

文章引用: 李扬帆, 田文康, 余文郡, 周颖. 高速公路改扩建作业区夜间轮廓标布设研究[J]. 交通技术, 2026, 15(3): 337-351. DOI: 10.12677/ojtt.2026.153031

Abstract

Nighttime traffic safety in highway reconstruction and expansion work zones is critically compromised by inadequate delineation. Due to the asymmetrical light pattern of the low beam cutoff line, this study focuses on the typical scenario of half-road two-way four-lane traffic maintenance during the “four-to-eight” lane expansion of the Shenhai National Expressway (G15) Kaiyang section. A nighttime low-beam headlight illumination simulation model was established using Lucidshape optical software. Results show that the right-to-left illuminance ratio increases significantly with longitudinal distance, reaching 13.85 at 96 m for the driving lane and 24.71 for the overtaking lane. Based on retroreflection coefficient theory, bilinear interpolation calculation, and area ratio parameter sensitivity analysis, a differentiated delineator layout scheme is proposed: Class V yellow retroreflective sheeting with an area ratio of 1.6 on the left side, and Class IV white retroreflective sheeting at 8 m intervals on the right side. Simulation results show that the maximum luminance ratio of the driving lane decreased from 13.85 to 4.08 (a reduction of 70.5%), and that of the overtaking lane decreased from 24.71 to 8.03 (a reduction of 67.5%). Economic evaluation indicates that the benefit-cost ratio (BCR) of the proposed solution is 4.58, demonstrating significant economic feasibility.

Keywords

Nighttime Traffic Safety, Highway Reconstruction and Expansion, Delineator Layout, Photometric Simulation, Retroreflection Coefficient, Visual Luminance Balance, Benefit-Cost Ratio

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国社会经济与城镇化进程加快,既有高速公路通行能力难以满足日益增长的交通需求,改扩建工程在全国大范围实施。施工期间道路多车道间歇性封闭,行车空间受限,车辆需频繁变道合流,道路线形、交通环境与安全设施均发生较大改变,驾驶人驾驶负荷明显增加。

夜间行车时安全隐患尤为突出。改扩建施工区普遍缺少完善的固定照明设施,驾驶人主要依靠车辆前照灯获取路况信息,受灯光照射范围与光形限制,对施工区的有效辨识距离不足,易因未能提前减速变道而闯入施工区域引发事故。Ullman 等[1]对美国高速公路施工作业区事故的系统分析表明,施工区事故率约为正常路段的 1.5 倍,夜间事故严重程度显著高于白天。Arditi 等[2]通过对伊利诺伊州施工区事故的统计分析发现,夜间施工区事故死亡率是白天的 2.5 倍。国内研究也表明,高速公路改扩建施工区事故的发生率和致死率均显著高于正常运营路段[3]。因此,加强施工区夜间视线诱导、保障行车安全已成为亟待解决的工程技术问题。

轮廓标作为关键视线诱导设施,通过逆反射效果反射车辆灯光,清晰示明道路线形与边界,对预防事故具有不可替代的作用。美国《统一交通控制设施手册》(MUTCD) [4]明确要求施工区应在道路两侧连续设置逆反射轮廓标。欧洲标准 EN 12899 [5]对固定式交通标志的逆反射性能也提出了分级要求。

然而在实际应用中,车辆近光灯左右光形存在固有的不对称性——根据 ECE R112 法规,近光灯的截止线在左侧(对向来车侧)较低,右侧(路肩侧)较高,导致右侧照射距离和范围显著大于左侧。加之轮廓标常规采用“左黄右白”均一化配置,驾驶人对两侧轮廓标亮度感知差异明显,视觉不对称问题突出[3]。

张圣[3]指出改扩建作业区夜间两侧视线诱导效果失衡是影响行车安全的重要因素。罗红杰等[6]研究了双向8车道高速公路轮廓标反光膜尺寸,但未涉及改扩建施工区工况。王玮[7]分析了轮廓标逆反射性能对安全行车的影响,但仅针对常规运营路段。Zwahlen [8]通过驾驶模拟试验研究了不同逆反射亮度下轮廓标的视认距离,发现逆反射系数与视认距离存在正相关关系。Sun 等[9]建立了考虑视距的施工区安全优化模型,但未涉及轮廓标差异化配置问题。

综合来看,目前研究多集中于常规运营路段,针对高速公路改扩建施工区——尤其是半幅双向通行这一复杂工况下——轮廓标的差异化优化布设研究仍较为不足。已有成果对左右照度不对称的量化分析和针对性补偿方案的研究均存在空白。

本研究依托沈海国家高速公路(G15)水口至白沙段改扩建工程(简称“开阳高速改扩建工程”),针对“四改八”施工期间半幅双向四车道保通的典型工况,综合运用 Lucidshape 夜间照明仿真、逆反射系数理论计算和工程经济性评价等方法,系统研究夜间轮廓标反光膜的类别、面积与间距的优化配置方案,以期同类改扩建工程的夜间交通安全设施设计提供科学依据和技术参考。本文的研究技术路线如图1所示。

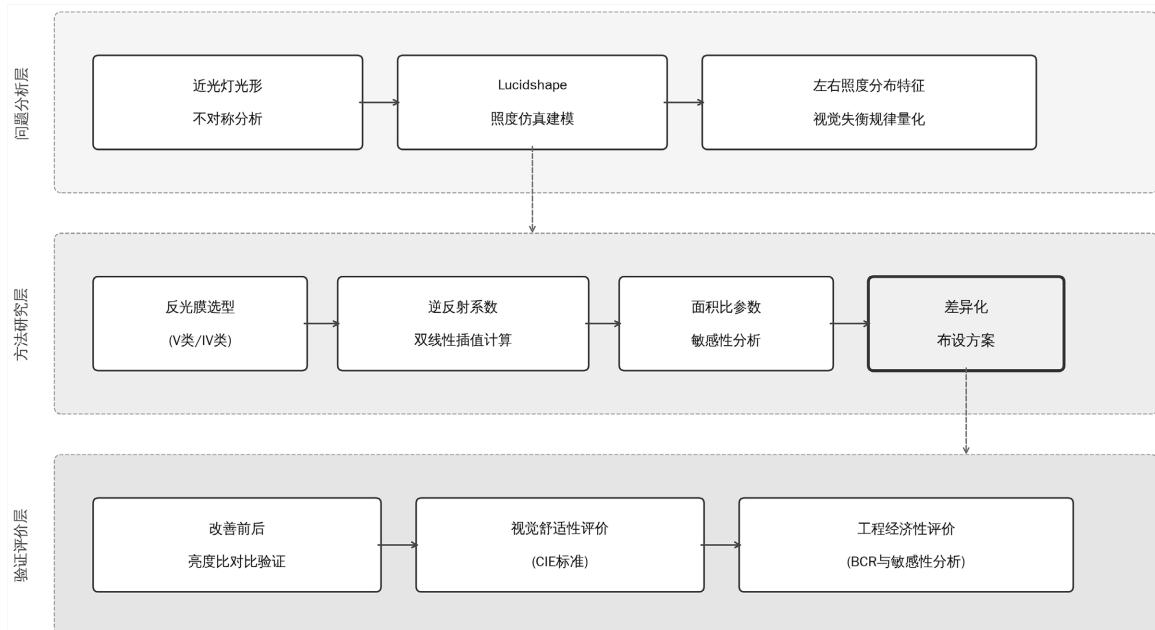


Figure 1. Research technical route

图1. 研究技术路线

2. 改扩建作业区夜间照度仿真分析

2.1. 仿真模型建立

为定量分析改扩建作业区夜间车辆前照灯的照度分布特征,本研究采用 Lucidshape 光学仿真软件建立夜间照明仿真模型。Lucidshape 是一款广泛应用于汽车照明设计与道路照明分析的专业光学仿真工具,能够精确模拟各类前照灯的光形分布,生成高精度的路面照度分布数据[10]。

仿真模型的关键参数设置如下:根据现有高速公路改扩建的实际道路宽度要求,假定车道宽度为 3.75 m,侧向余宽为 0.75 m;以小型客车为分析对象,车辆前照灯距水平面的高度 h_1 取为 0.625 m,驾驶人眼位置高度取为 1.2 m。根据现行国家标准《轮廓标》(GB/T 24970-2020) [11]的规定,轮廓标最小间距为 8 m。仿真模型参数汇总如表1所示。基于上述参数建立的仿真场景如图2所示。

Table 1. Key parameters of the simulation model
表 1. 仿真模型关键参数

参数	取值	依据
车道宽度	3.75 m	改扩建实际道路宽度
侧向余宽	0.75 m	规范要求
前照灯安装高度 h_1	0.625 m	小型客车典型值
驾驶人眼高	1.2 m	GB 5768
轮廓标布设间距	8 m	GB/T 24970 最小间距
灯光类型	近光灯	ECE R112 配光标准
分析距离范围	30~100 m	夜间行车决策关键距离

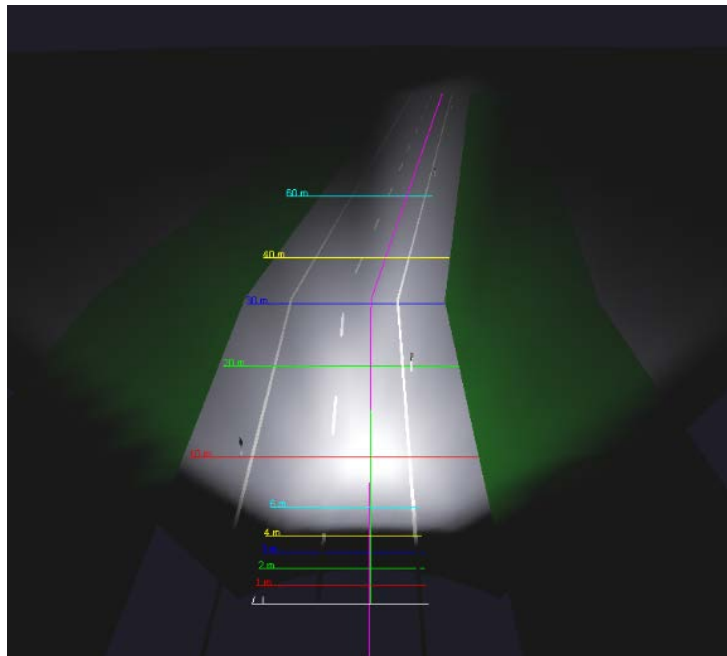


Figure 2. Lucidshape nighttime illumination simulation scene
图 2. Lucidshape 夜间照明仿真场景

2.2. 仿真结果分析

仿真结果表明，近光灯在 8 m 间距条件下，30 m 范围内的轮廓标视认距离能够得到有效保障。因此，本次照度分析从车辆前方 30 m 处开始计算，至 100 m 处结束，覆盖了驾驶人夜间行车决策的关键距离区间。

根据 Lucidshape 仿真得到的近光灯夜间照度分布结果，分别提取了车辆位于行车道和超车道中心位置时，32~96 m 范围内左右两侧轮廓标位置处的照度值。行车道位置各距离处的照度分布数据如表 2 所示。

Table 2. Illuminance values at different distances for driving lane
表 2. 行车道不同距离照度值

距离/m	32	40	48	56	64	72	80	88	96
左侧照度/lx	9.60	6.48	3.65	2.06	1.15	0.58	0.30	0.20	0.13
右侧照度/lx	31.15	25.58	18.20	11.63	6.46	5.05	3.52	2.51	1.80
比值(右/左)	3.24	3.94	4.99	5.65	5.62	8.71	11.73	12.55	13.85

由表 2 可知, 行车道位置的右侧照度在所有距离上均显著高于左侧, 且右/左照度比总体随距离增大而增大, 从 32 m 处的 3.24 上升至 96 m 处的 13.85。值得注意的是, 64 m 处的比值(5.62)较 56 m 处(5.65)略有下降, 这是由于该位置恰好处于近光灯截止线过渡区域, 左右两侧照度衰减速率的局部变化导致比值出现微小波动, 但不影响整体递增趋势。

车辆在超车道位置时各距离处的照度分布数据如表 3 所示。

Table 3. Illuminance values at different distances for overtaking lane

表 3. 超车道不同距离照度值

距离/m	32	40	48	56	64	72	80	88	96
左侧照度/lx	16.50	10.13	4.66	2.38	1.24	0.61	0.31	0.21	0.14
右侧照度/lx	8.00	8.46	8.48	8.24	7.82	6.94	5.53	4.41	3.46
比值(右/左)	0.48	0.84	1.82	3.46	6.31	11.38	17.84	21.00	24.71

由表 3 可知, 超车道位置的照度不对称规律与行车道有所不同。在 32~40 m 的近距离范围内, 左侧照度反而高于右侧(比值小于 1), 这是由于超车道位于道路内侧, 近光灯对左侧护栏位置的照射角度相对有利。但随着距离增大, 右/左比值迅速攀升, 至 96 m 处已达 24.71, 不对称程度甚至超过行车道。

行车道和超车道左右两侧照度分布曲线如图 3 所示。

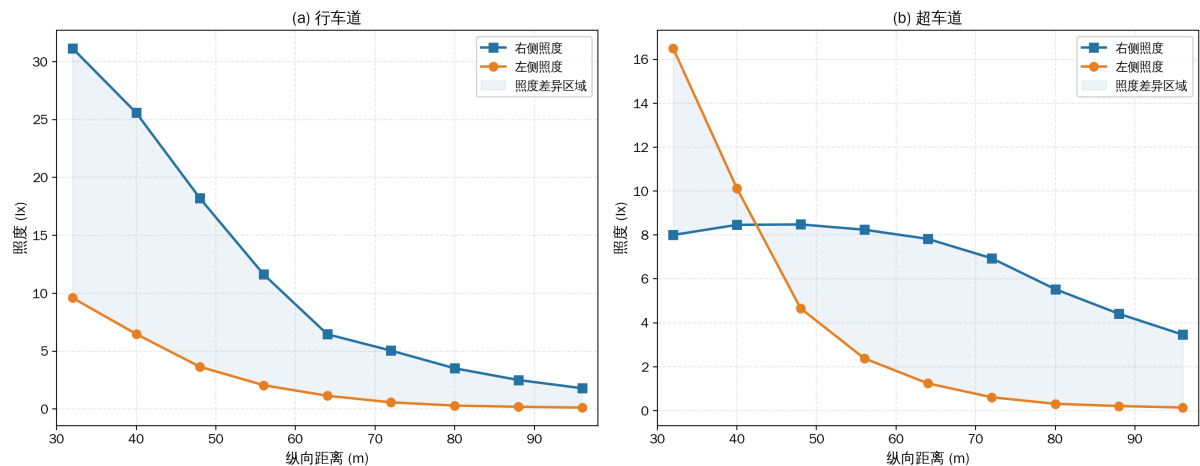


Figure 3. Illuminance distribution on both sides of driving and overtaking lanes

图 3. 行车道与超车道左右侧照度分布

综合两个车道的右/左照度比数据汇总如表 4 和图 4 所示。

Table 4. Right/left illuminance ratio at different distances (right/left)

表 4. 各车道不同距离路面照度比值(右/左)

车道\距离/m	32	40	48	56	64	72	80	88	96
行车道	3.24	3.94	4.99	5.65	5.62	8.71	11.73	12.55	13.85
超车道	0.48	0.84	1.82	3.46	6.31	11.38	17.84	21.00	24.71

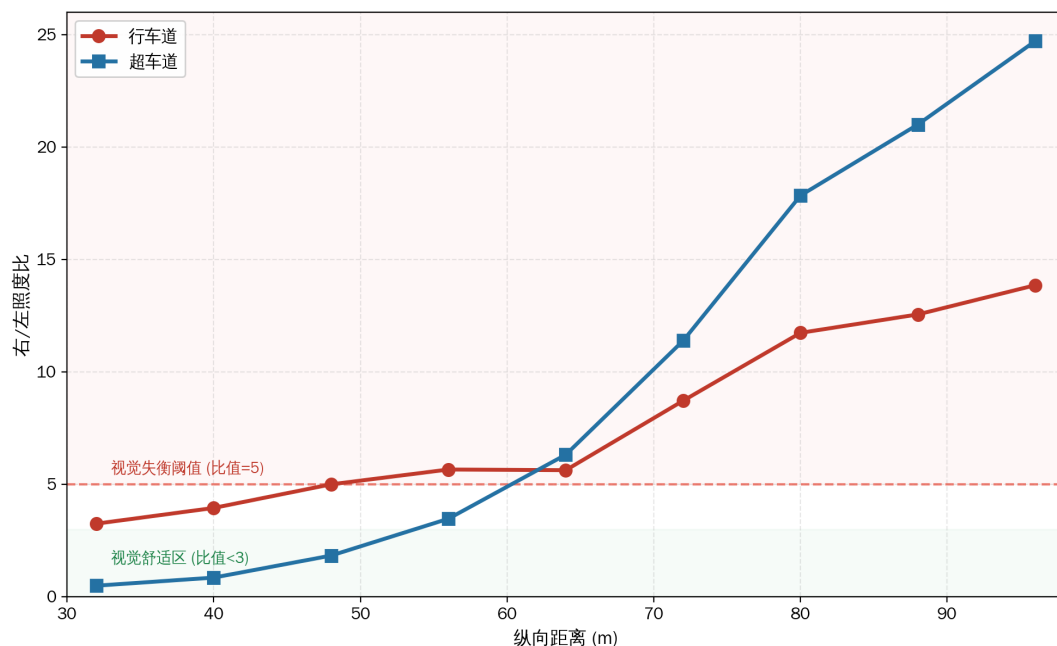


Figure 4. Right/left illuminance ratio variation trend with distance
图 4. 各车道右/左照度比随距离变化趋势

从表 4 和图 4 可以清晰看出, 无论行车道还是超车道, 左右两侧照度比均随纵向距离的增大而显著增大, 表明近灯光形不对称对轮廓标视认效果的负面影响随距离增大而加剧。参考国际照明委员会 (CIE) 关于道路照明均匀度的建议[12], 当左右亮度比超过 3~5 时, 驾驶人将产生明显的视觉不适感。由图 4 可见, 在 64 m 以远的区域, 两个车道的照度比均超过 5, 驾驶人面临的视觉失衡问题已十分突出, 亟需通过轮廓标的差异化布设来加以改善。

3. 轮廓标差异化布设方案设计

3.1. 设计思路与反光膜选型

针对上述照度仿真分析所揭示的左右视觉不对称问题, 本研究提出通过差异化配置左右两侧轮廓标的反光膜类别和面积来补偿近灯光形不对称造成的亮度差异。核心思路是: 在照度较低的一侧(左侧)采用逆反射性能更高的反光膜类别并适当增大反光膜面积, 在照度较高的一侧(右侧)采用较低等级的反光膜, 从而使驾驶人感知到的左右轮廓标亮度趋于均衡。

在反光膜类别的选择上, 本研究参考现行标准《轮廓标》(GB/T 24970) [11] 中的反光膜分类体系, 选取 V 类反光膜作为左侧轮廓标的反光体, IV 类反光膜作为右侧轮廓标的反光体。V 类反光膜(微棱镜型)具有较高的逆反射系数, 在较大的观测角和入射角条件下仍能保持良好的反光性能, 适合用于照度较低的左侧以提升视认效果。IV 类反光膜(微棱镜型)逆反射性能适中, 用于照度较高的右侧可以避免过度反光。在颜色配置上, 遵循“左黄右白”的惯例, 左侧采用黄色、右侧采用白色。布设间距统一采用规范规定的最小间距 8 m。

3.2. 逆反射系数分析

反光膜的逆反射系数是衡量轮廓标反光性能的关键技术指标。根据反光膜的技术参数[7], IV 类和 V 类反光膜在不同观测角和入射角条件下的逆反射系数如表 5 所示。

Table 5. Retroreflection coefficients of retroreflective sheeting ($\text{cd}\cdot\text{lx}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)
表 5. 直线段反光膜逆反射系数($\text{cd}\cdot\text{lx}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)

观测角	入射角	IV 类白色	IV 类黄色	V 类白色	V 类黄色
0.5°	-4°	150	110	420	315
0.5°	15°	111	82	252	189
1°	-4°	35	26	120	90
1°	15°	28	20	72	54

由表 5 可知, V 类反光膜的逆反射系数在各角度条件下均显著高于 IV 类, 约为 IV 类的 2.5~3 倍。这为左侧采用 V 类、右侧采用 IV 类的差异化配置提供了充分的技术支撑。

为准确计算不同距离处轮廓标的实际逆反射性能, 需要确定各位置的观测角和入射角。逆反射系数 RA 的计算公式如式(1)所示:

$$R_A = d_0^2 \cdot E / (E_{\sigma} \cdot \cos^2 \alpha \cdot A) \quad (1)$$

式中: d_0 为探测器与试样中心的水平距离; A 为试样单位面积; α 为观测角; E 为被测样品反射到探测器的照度; E_{σ} 为光源到样品中心的垂直照度。

为便于理解后续的逆反射系数计算过程, 图 5 给出了车辆、驾驶员眼点与轮廓标之间的几何位置关系示意图, 直观展示了观测角 α (入射光线与反射光线之间的夹角)和入射角 β (入射光线与轮廓标法线之间的夹角)的定义。其中, 前照灯发出的光线以入射角 β 照射到轮廓标反光膜表面, 经逆反射后沿接近入射方向返回, 被驾驶员眼点接收。观测角 α 的大小取决于前照灯与驾驶员眼点之间的垂直距离以及轮廓标的纵向距离, 而入射角 β 则由车辆横向偏移量与纵向距离共同决定。

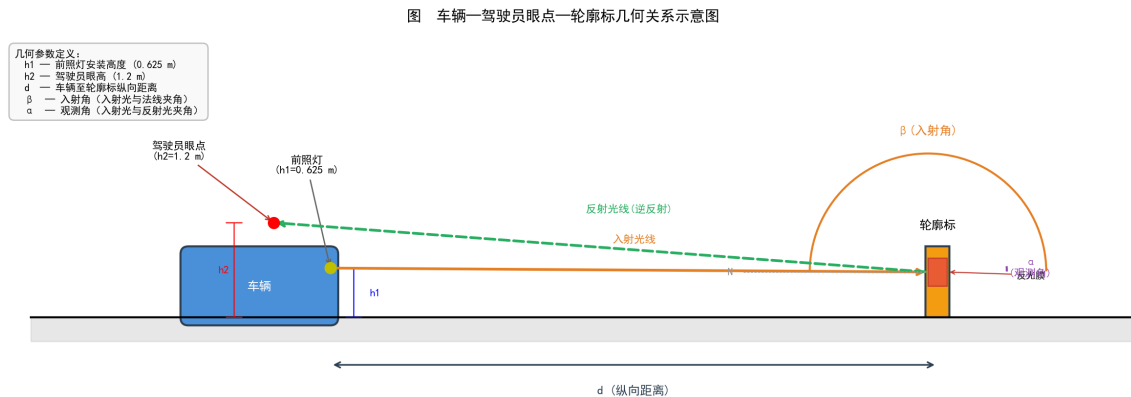


Figure 5. Geometric relationship between vehicle, driver eye point, and delineator

图 5. 车辆 - 驾驶员眼点 - 轮廓标几何关系示意图

通过几何关系计算, 分别得到车辆在超车道和行车道中心位置行驶时各距离处左右两侧轮廓标位置的入射角值, 如表 6 和表 7 所示。

Table 6. Entrance angle values at different distances for overtaking lane
表 6. 超车道不同距离的入射角值

距离/m	32	40	48	56	64	72	80	88	96
左侧入射角/(°)	9.59	7.70	6.42	5.51	4.83	4.30	3.87	3.52	3.23
右侧入射角/(°)	13.87	11.15	9.31	7.99	7.00	6.23	5.61	5.10	4.68

Table 7. Entrance angle values at different distances for driving lane
表 7. 行车道不同距离的入射角值

距离/m	32	40	48	56	64	72	80	88	96
左侧入射角/(°)	13.87	11.15	9.31	7.99	7.00	6.23	5.61	5.10	4.68
右侧入射角/(°)	4.59	3.69	3.08	2.64	2.31	2.06	1.85	1.68	1.54

采用双线性插值方法, 将表 5 中的标准角度逆反射系数数据与表 6、表 7 中的实际入射角相结合, 可以计算得到各距离处左右两侧轮廓标的实际逆反射系数。逆反射系数随距离的变化如图 6 所示, 行车道和超车道的计算结果分别列于表 8 和表 9。

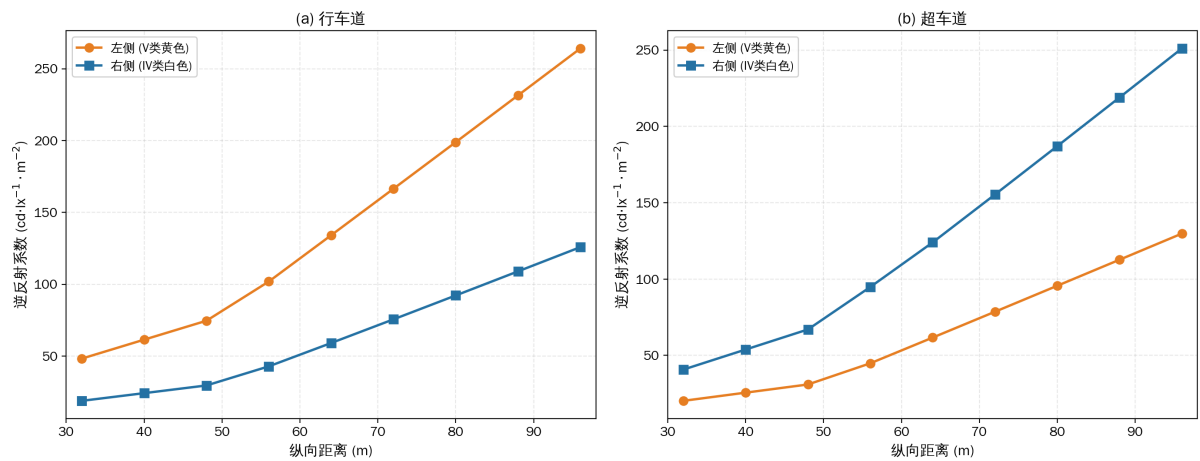


Figure 6. Retroreflection coefficient variation with distance
图 6. 各车道左右侧逆反射系数随距离变化

Table 8. Retroreflection coefficients at different distances for driving lane ($cd \cdot lx^{-1} \cdot m^{-2}$)
表 8. 行车道不同距离的逆反射系数($cd \cdot lx^{-1} \cdot m^{-2}$)

距离/m	32	40	48	56	64	72	80	88	96
左侧(V类黄色)	48.19	61.38	74.56	101.85	134.06	166.43	198.90	231.50	264.15
右侧(IV类白色)	18.79	24.14	29.50	42.80	59.04	75.52	92.17	108.95	125.81
右/左	0.39	0.39	0.40	0.42	0.44	0.45	0.46	0.47	0.48

Table 9. Retroreflection coefficients at different distances for overtaking lane ($cd \cdot lx^{-1} \cdot m^{-2}$)
表 9. 超车道不同距离的逆反射系数($cd \cdot lx^{-1} \cdot m^{-2}$)

距离/m	32	40	48	56	64	72	80	88	96
左侧(V类黄色)	20.24	25.60	30.96	44.83	61.66	78.60	95.62	112.69	129.81
右侧(IV类白色)	40.71	53.85	67.01	94.82	124.00	155.38	187.08	219.00	251.10
右/左	0.49	0.47	0.46	0.47	0.50	0.51	0.51	0.51	0.52

3.3. 面积比参数优化

左侧反光膜面积的增大是进一步补偿左侧照度不足的关键手段。为确定最优面积比参数, 本研究对面积比在 1.0~2.0 范围内进行了敏感性分析。

设左侧反光膜面积为右侧的 k 倍, 则改善后的人眼视觉亮度比可表示为:

$$\text{亮度比(改善后)} = (E_{R} \cdot R_{A,R}) / (E_{L} \cdot R_{A,L} \cdot k) \quad (2)$$

式中： E_{R} 、 E_{L} 分别为右、左侧照度； $R_{A,R}$ 、 $R_{A,L}$ 分别为右、左侧反光膜逆反射系数； k 为面积比。

以行车道 96 m 和 64 m 处、超车道 96 m 处为关键控制点，不同面积比下的人眼视觉亮度比如图 7 所示。

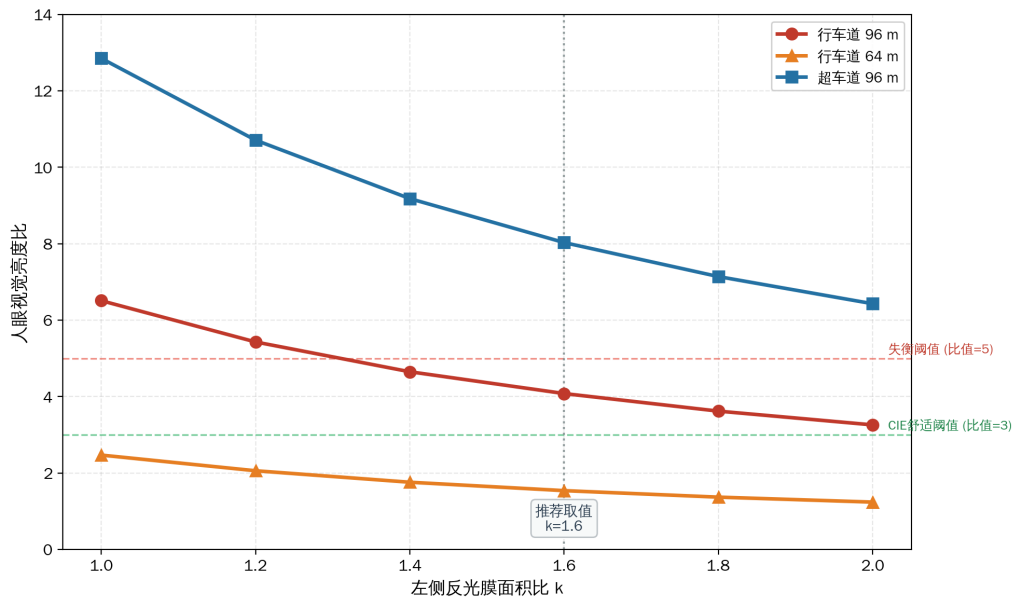


Figure 7. Luminance ratio variation under different area ratios

图 7. 不同面积比下远端人眼视觉亮度比变化

由图 7 可知：当面积比 $k = 1.0$ 时，行车道 96 m 处亮度比仍高达 6.51，视觉失衡明显；随着 k 的增大，各距离处亮度比均呈递减趋势；当 $k = 1.6$ 时，行车道 96 m 处亮度比降至 4.08，64 m 处降至 1.54，参考 CIE 推荐的左右亮度比舒适阈值 3~5 [12]，行车道在 80 m 以内的亮度比均控制在推荐阈值以下；继续增大 k 至 1.8、2.0，改善效果的边际收益递减，且面积过大将增加材料成本和施工难度。

综合视觉改善效果和经济性考量，选定面积比 $k = 1.6$ 作为推荐取值。最终确定的差异化布设方案如表 10 所示。

Table 10. Differentiated layout scheme

表 10. 差异化布设方案

位置	反光膜类别	颜色	面积比	间距/m
左侧	V 类	黄色	1.6	8
右侧	IV 类	白色	1.0	8

3.4. 人眼视觉亮度比计算

驾驶人实际感知到的轮廓标亮度取决于该位置处的照度与反光膜逆反射系数的乘积，即：

$$L = R_{A} \times E \quad (3)$$

式中： L 为人眼感知的视觉亮度指标； R_{A} 为反光膜逆反射系数； E 为轮廓标位置处的照度值。需要指

出, 式(3)与式(1)的区别在于: 式(1)定义的是反光膜材料本身的逆反射系数(作为输入参数), 而式(3)计算的是驾驶人在特定照度条件下实际感知到的亮度效果(作为输出评价指标), 两者分属不同的计算层面。

根据差异化布设方案(左侧 V 类黄色、面积比 1.6; 右侧 IV 类白色), 分别计算行车道和超车道各距离处改善后的人眼视觉亮度比。行车道和超车道的计算结果分别如表 11 和表 12 所示。

Table 11. Improved visual luminance ratio for driving lane

表 11. 行车道改善后的人眼视觉亮度比

距离/m	32	40	48	56	64	72	80	88	96
改善后亮度比	0.78	0.96	1.21	1.48	1.54	2.45	3.37	3.69	4.08

Table 12. Improved visual luminance ratio for overtaking lane

表 12. 超车道改善后的人眼视觉亮度比

距离/m	32	40	48	56	64	72	80	88	96
改善后亮度比	0.15	0.25	0.52	1.02	1.97	3.63	5.69	6.69	8.03

4. 布设方案效果验证与分析

4.1. 改善前后对比分析

为全面评价差异化布设方案的改善效果, 将改善前后的人眼视觉亮度比进行对比分析, 如图 8 所示。

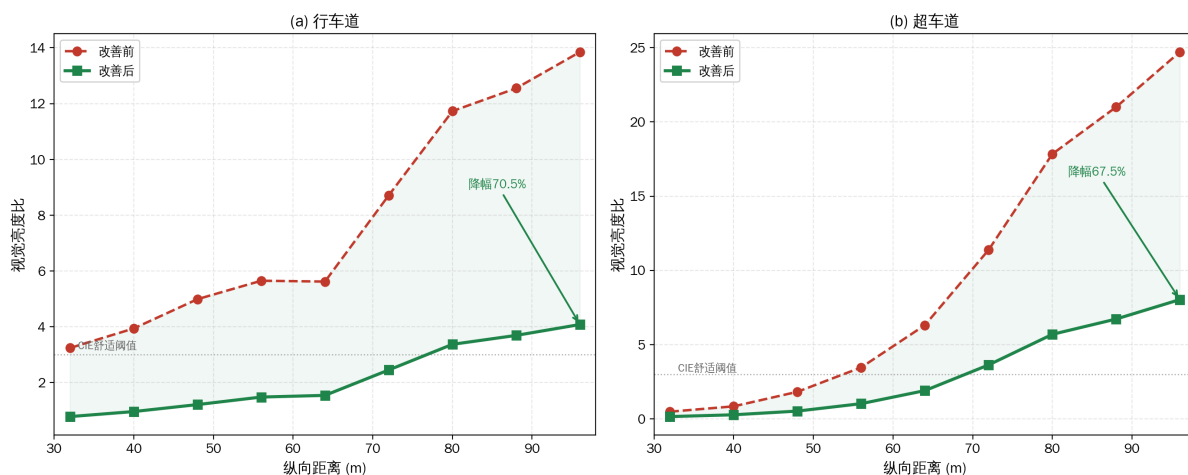


Figure 8. Comparison of visual luminance ratio before and after improvement

图 8. 改善前后人眼视觉亮度比对比

改善前, 行车道最大亮度比(96 m 处)为 13.85, 超车道最大亮度比(96 m 处)为 24.71; 采用差异化布设方案后, 行车道最大亮度比降至 4.08, 降幅达 70.5%, 超车道最大亮度比降至 8.03, 降幅达 67.5%。两个车道的视觉不对称效应均得到了显著改善。

4.2. 分距离段改善效果评价

从亮度比的分布趋势来看, 改善效果可分为三个距离段进行分析, 如表 13 所示。

改善效果的物理机理可从以下三个层面理解: 其一, 左侧采用 V 类反光膜替代常规反光膜, 逆反射系数大幅提升(约为 IV 类的 2.5~3 倍), 有效弥补了左侧照度不足的缺陷; 其二, 左侧反光膜面积增大至

1.6 倍, 进一步提高了左侧轮廓标的总反射光通量; 其三, 右侧采用 IV 类反光膜适当降低了右侧的反射亮度, 避免了右侧过度反光对驾驶人视觉的干扰。三者协同作用, 实现了左右视觉亮度的有效均衡。

Table 13. Improvement evaluation by distance segment

表 13. 分距离段改善效果评价

距离段	行车道亮度比	超车道亮度比	改善评价
近距离(32~48 m)	0.78~1.21	0.15~0.52	亮度比趋近 1, 左右近乎均衡
中距离(56~72 m)	1.48~2.45	1.02~3.63	控制在 CIE 推荐阈值以内
远距离(80~96 m)	3.37~4.08	5.69~8.03	大幅缩小, 超车道仍有不对称

4.3. 视觉舒适性评价

参考 CIE 115:2010 [12]关于道路照明均匀度的建议, 当视野内亮度比不超过 3:1 时, 驾驶人视觉舒适性较好; 超过 5:1 时, 产生明显不适感。

基于上述判据, 差异化布设方案在行车道全距离范围内的亮度比均控制在 5 以内(最大 4.08), 视觉舒适性得到了根本改善。超车道在 72 m 以内亮度比均控制在 3.63 以下, 接近舒适阈值; 远距离虽仍有一定不对称性(96 m 处为 8.03), 但相较改善前的 24.71 已缩小约 2/3, 改善效果十分显著。

需要指出, 上述分析均以小型客车为基准车型。在改扩建施工区, 货车占比通常较高(约 30%~40%), 其前照灯安装高度(约 0.8~1.2 m)显著高于小型客车(0.625 m), 驾驶员眼高也更高(约 1.8~2.2 m)。灯位的提高将改变入射角的大小: 在相同纵向距离下, 货车对左侧轮廓标的入射角略有减小, 使得 V 类反光膜的逆反射系数在该角度区间内进一步增大, 有利于提升左侧轮廓标的反射亮度。同时, 货车驾驶员较高的视点位置使得观测角相应减小, 在远距离处观测角更趋近于 0.5°的最优角度区间, 逆反射效率更高。因此, 本文提出的差异化方案对货车驾驶员同样具有正向的亮度均衡效果。

进一步考虑车型差异的影响, 本方案参数是否需要针对不同车型分别设计值得讨论。由于 V 类反光膜在大观测角和大入射角条件下均保持较高的逆反射系数, 面积比 $k = 1.6$ 的设计留有一定的安全裕度。对于货车而言, 其较高的灯位使得远距离处入射角更小、逆反射系数更高, 因此同一面积比参数下货车驾驶员感知到的左侧亮度补偿效果实际上优于小型客车。综合分析表明, 当前方案参数无需针对货车单独调整, $k = 1.6$ 的取值对小型客车和货车均具有良好的适用性。

此外, 本文分析基于直线段工况, 而改扩建施工区常涉及平曲线路段。在弯道上, 车辆与轮廓标之间的几何关系发生变化, 入射角不再仅由纵向距离决定, 还受弯道曲率的影响。具体而言, 在弯道内侧(凹侧), 轮廓标相对于车辆的横向偏距减小, 入射角趋于减小, 逆反射系数相应增大; 而在弯道外侧(凸侧), 横向偏距增大, 入射角增大, 逆反射系数有所降低。这种入射角的不对称变化会在一定程度上影响直线段方案的亮度均衡效果。然而, 由于本方案中 V 类反光膜在 $-4^\circ \sim 15^\circ$ 的宽角度范围内均保持较高的逆反射性能, 且面积比 1.6 提供了额外的补偿裕度, 因此对于大多数常见曲线半径($R \geq 500$ m)的路段, 直线段方案参数仍可基本适用。

针对平曲线路段的适用性问题, 建议在实际工程应用中根据弯道半径和转角大小对面积比参数进行适当调整: 对于半径大于 1000 m 的缓和曲线, 入射角变化较小($<2^\circ$), 可直接沿用直线段方案参数; 对于半径 500~1000 m 的一般曲线段, 建议将弯道外侧(凸侧)轮廓标面积比适当增大 0.1~0.2, 以补偿入射角增大导致的逆反射系数下降; 对于半径小于 500 m 的急弯路段, 建议结合具体线形参数进行针对性的逆反射系数复核计算。

综合以上分析, 差异化布设方案在理论层面能够有效抑制近灯光形不对称导致的视觉失衡效应,

对提升改扩建作业区夜间行车安全具有积极意义。方案的核心参数——反光膜类别(左 V 右 IV)、颜色(左黄右白)、面积比(1.6)和间距(8 m)——构成了一套完整的技术指标体系,可作为同类工程的参考依据。

5. 工程经济性评价

5.1. 评价方法与指标

工程经济性评价是衡量交通安全改善方案是否值得推广实施的重要依据。本文采用效益成本比(BCR)作为评价指标,该方法在交通安全工程领域应用广泛、操作简便且物理意义明确[13]。效益成本比的计算公式如式(4)所示:

$$BCR = B/C' \quad (4)$$

式中: B 为方案实施后产生的经济效益总和; C' 为方案的总成本投入。当 $BCR > 1$ 时,表示方案的经济效益超过成本投入,方案具有经济可行性; BCR 值越大,经济效益越显著。

5.2. 成本估算

以开阳高速公路改扩建工程为评价对象,路线全长 125.2 公里。在半幅双向四车道保通阶段,按照 8 m 间距进行轮廓标布设,全线左右两侧共需约 6.26 万个轮廓标。参照广东省交通工程市场询价,附着式轮廓标(含安装)单价约为 8 元/个,基础材料费合计约为 50 万元。

本方案对轮廓标的反光膜等级和面积尺寸提出了差异化要求:左侧需采用 V 类黄色反光膜且面积增大至 1.6 倍,综合考虑反光膜等级升级和面积增大带来的成本增量,假定材料成本增加 30%,即额外增加材料成本约 15 万元。成本估算明细见表 14。

除上述直接材料与维护成本外,实际工程实施还涉及物流运输、仓储管理、施工组织管理及工人培训等间接成本。参照类似改扩建工程的施工管理经费比例,间接成本一般占直接材料成本的 10%~15%,本文取 12% 进行估算,即间接成本约为 $15.0 \times 12\% = 1.8$ 万元。此外,根据反光膜生产厂商提供的产品技术资料及工程实际调研,IV 类微棱镜反光膜的实际户外使用寿命一般为 5~7 年,V 类为 7~10 年,远超改扩建施工期(2~3 年),施工期内无需考虑反光膜自然老化更换。据此,额外总成本由 22.5 万元调整为约 24.3 万元(含间接成本 1.8 万元),对 BCR 的影响较小(BCR 由 4.58 降至约 4.24),方案经济可行性结论不变。

Table 14. Cost estimation summary

表 14. 成本估算汇总

项目	计算过程	金额/万元
基础材料费	6.26 万个 \times 8 元/个	50.0
反光膜升级增量	50.0 \times 30%	15.0
维护更换费	15.0 \times 50%	7.5
额外总成本 C'	材料增量 + 维护	22.5

5.3. 效益估算

轮廓标布设方案的经济效益主要体现为交通事故及其损失的减少。在事故成本取值方面,本研究综合参考 NCHRP 第 627 号研究[1]的标准化估算方法以及马社强等[14]建立的道路交通事故社会经济损失评价模型,取人伤事故平均成本为 150 万元/起,财产损失事故平均成本为 0.8 万元/起。

在事故数据方面,根据广东省同类高速公路历史事故统计数据,开阳高速改扩建施工期间涉及施工

区的交通事故中,人伤事故约3起/年,财产损失事故约2.3起/年。根据国内外相关研究文献,规范化的轮廓标布设方案可将施工区夜间事故率降低5%~15%。本文取事故减少率为10%作为基准值。效益计算过程如下:

$$\text{年事故损失} = 3 \times 150 + 2.3 \times 0.8 = 451.84 \text{ 万元/年}$$

$$\text{年安全效益} = 451.84 \times 10\% = 45.18 \text{ 万元/年}$$

假定改扩建施工期约3年,折现率5%,则效益现值为:

$$B = 45.18 \times \left[\frac{1 - (1 + 5\%)^{-3}}{5\%} \right] = 45.18 \times 2.723 \approx 103.1 \text{ 万元} \quad (5)$$

5.4. 敏感性分析

由于事故减少率、材料成本增幅等参数的取值具有一定的不确定性,有必要对关键参数进行敏感性分析。本文选取事故减少率、材料成本增幅、设施损耗率和事故成本单价四个关键参数,分析结果如表15所示。

Table 15. Sensitivity analysis results

表 15. 敏感性分析结果

参数	基准值	不利调整	不利 BCR	有利调整	有利 BCR
事故减少率	10%	降至 5%	2.29	升至 15%	6.87
材料成本增幅	30%	升至 50%	4.08	降至 15%	5.24
设施损耗率	50%	升至 80%	3.82	降至 30%	5.72
事故成本单价	150 万元	降至 100 万元	3.21	升至 200 万元	5.95

敏感性分析的龙卷风图如图9所示。

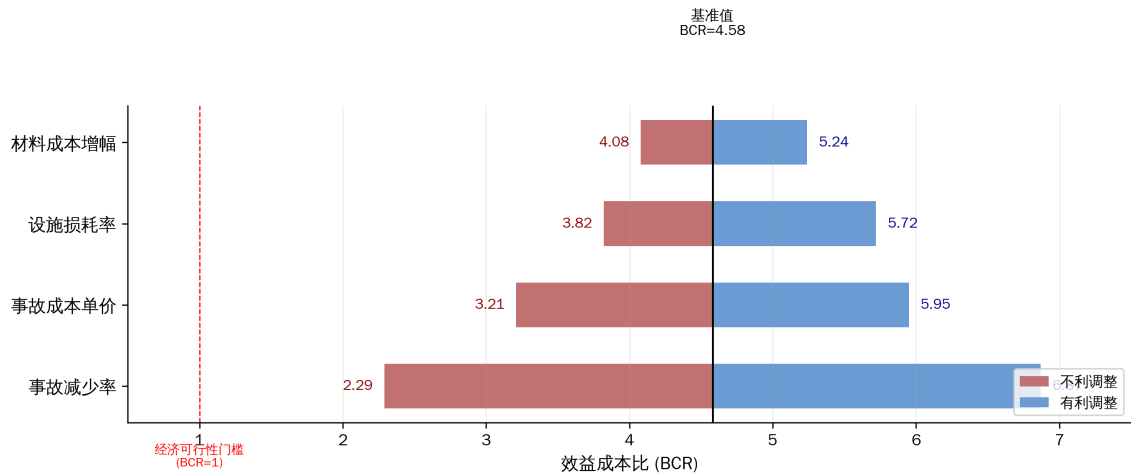


Figure 9. Sensitivity analysis of key parameters (tornado chart)

图 9. 关键参数敏感性分析(龙卷风图)

由图8可知,事故减少率是对BCR影响最大的参数,其次为事故成本单价和设施损耗率,材料成本增幅的影响最小。在所有不利情景下,BCR的最小值为2.29(事故减少率降至5%),仍远大于经济可行性门槛值1。这表明方案的经济可行性具有很强的稳健性。

5.5. 经济性评价结果

将效益现值与额外成本代入式(4)，得到效益成本比：

$$BCR = 103.1/22.5 = 4.58 \quad (6)$$

经济性评价结果如图 10 所示。

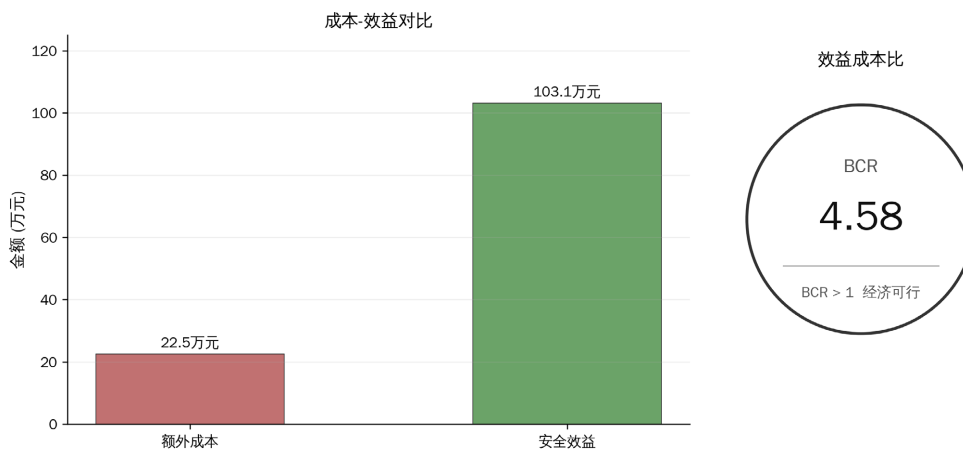


Figure 10. Economic evaluation of differentiated layout scheme
图 10. 差异化布设方案经济性评价

$BCR = 4.58$ ，远大于 1，表明本方案具有显著的经济可行性。这意味着每投入 1 元用于轮廓标差异化布设改造，即可产生约 4.58 元的安全效益回报。敏感性分析表明，即使在最不利的参数组合下(事故减少率仅 5%)， BCR 仍可达到 2.29，方案的经济可行性不受单一参数波动的影响。

上述分析表明，差异化布设方案仅增加约 22.5 万元的额外成本投入，即可带来逾百万元的安全效益，综合视认改善效果与经济性双重评价结果，本方案具有明确的工程推广应用价值。

6. 结论与展望

6.1. 主要结论

本文依托开阳高速公路“四改八”改扩建工程，系统研究了半幅双向四车道保通阶段夜间轮廓标的差异化布设方案。通过照度仿真分析、逆反射理论计算、面积比参数优化和工程经济性评价四个层面的综合研究，形成了以下核心认识。

近光灯光形不对称导致改扩建作业区夜间左右两侧照度分布存在显著差异。Lucidshape 仿真结果显示，行车道右/左照度比在 32~96 m 范围内由 3.24 升至 13.85，超车道由 0.48 升至 24.71，视觉失衡效应随纵向距离的增大而显著加剧，在 64 m 以远区域尤为突出。参考 CIE 推荐的亮度比舒适阈值 3~5，常规均一化布设方案在远距离区域已严重超标。

针对上述问题，本文基于逆反射系数理论与面积比参数敏感性分析，提出了左侧 V 类黄色反光膜(面积比 1.6)与右侧 IV 类白色反光膜(8 m 间距)的差异化布设方案。改善后行车道最大亮度比由 13.85 降至 4.08 (降幅 70.5%)，超车道由 24.71 降至 8.03 (降幅 67.5%)，视觉不对称效应得到显著抑制。面积比参数敏感性分析表明， $k = 1.6$ 在视觉改善效果与经济可实施性之间取得了较好的平衡。

工程经济性评价结果表明，差异化布设方案的效益成本比 $BCR = 4.58$ ，远大于 1，具有显著的经济可行性。多参数敏感性分析进一步证实，即使在最不利情景下(事故减少率仅 5%)， BCR 仍达 2.29，方案的

经济可行性具有较强的稳健性，值得在同类改扩建项目中推广应用。

6.2. 研究展望

本研究仍存在一些局限性，有待后续深入研究。首先，本文仅以小型客车为分析对象，而改扩建施工区重型货车占比较高，其前照灯安装高度和光形分布与小型客车差异显著，后续应纳入货车、SUV等多种车型工况。其次，方案的优化和效果评价均基于仿真计算和理论分析，尚需通过驾驶模拟器试验或实车夜间测试予以验证。

此外，本文仅分析了直线段工况，对于弯道、互通立交、匝道等复杂线形条件下轮廓标入射角和视认特性的变化尚未涉及。雨雾等恶劣天气条件下反光膜逆反射性能的衰减规律及其对布设方案适用性的影响也值得进一步研究。随着主动发光轮廓标和智能可变信息标志技术的发展，基于实时交通流和环境感知的自适应视线诱导系统也是未来值得探索的方向。

参考文献

- [1] Ullman, G.L., Finley, M.D., Bryden, J.E., *et al.* (2008) NCHRP Report 627: Traffic Safety Evaluation of Nighttime and Daytime Work Zones. Transportation Research Board.
- [2] Ardit, D., Lee, D. and Polat, G. (2007) Fatal Accidents in Nighttime Vs. Daytime Highway Construction Work Zone. *Journal of Safety Research*, **38**, 399-405. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2007.04.001>
- [3] 张圣. 高速公路改扩建施工作业区夜间临时交通安全设施设置研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2015.
- [4] Federal Highway Administration (2009) Manual on Uniform Traffic Control Devices (MUTCD). U.S. Department of Transportation.
- [5] European Committee for Standardization (2007) EN 12899-1: Fixed, Vertical Road Traffic Signs. CEN.
- [6] 罗红杰, 许慧文. 双向 8 车道高速公路轮廓标反光膜尺寸研究[J]. *公路交通科技(应用技术版)*, 2017, 13(5): 301-303.
- [7] 王玮. 轮廓标逆反射性能及其对安全行车的影响[J]. *交通标准化*, 2009(20): 30-32.
- [8] Zwahlen, H.T. (1989) Conspicuity of Suprathreshold Reflective Targets in a Driver's Peripheral Vision Field at Night. *Transportation Research Record*, **1213**, 35-46.
- [9] Sun, C., Edara, P. and Hou, Y. (2014) Modeling and Optimizing Work Zone Safety with Sight Distance Considerations. *Journal of Transportation Engineering*, **140**, Article ID: 04014005.
- [10] Synopsys (2023) LucidShape: Optical Design Software for Automotive Lighting. <https://www.synopsys.com/optical-solutions/lucidshape.html>
- [11] 中华人民共和国国家标准. GB/T 24970-2010 轮廓标[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [12] CIE (2010) CIE 115:2010 Lighting of Roads for Motor and Pedestrian Traffic. Commission Internationale de l'Eclairage.
- [13] 公路科学研究院. 公路交通安全设施经济评价方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [14] 马社强, 朱顺应, 王红, 等. 道路交通事故社会经济损失评价方法[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(6): 158-167.