

窄岛化收费站车道布局对驾驶员行为的影响及优化

齐建磊

河北冀翔通电子科技有限公司 河北 石家庄 050000

【摘要】：窄岛化收费站车道布局属高速公路交通节点关键技术配置，空间参数直接作用于驾驶员操作行为与通行效率，探究车道宽度缩减、岛体形态优化对驾驶员车道选择、车速控制及转向操作的影响机制，融合驾驶模拟实验与实地数据采集，阐释窄岛化布局中驾驶员视觉感知特征与行为响应规律。适度窄岛化设计可引导驾驶员规范行为，压缩占地空间，增强通行安全性；布局参数失配则可能引发车道偏离、减速过度等风险行为，依据驾驶员行为特征，提出车道宽度、岛体过渡段斜率等关键参数优化方案，为窄岛化收费站技术升级给予理论支撑。

【关键词】：窄岛化收费站；车道布局；驾驶员行为；参数优化；通行安全

DOI:10.12417/2811-0536.26.06.067

引言

高速公路收费站作为交通流转换核心节点，布局设计影响通行效率与安全，伴随交通流量持续增长，传统宽岛式收费站占地广、车道利用率低的问题日益突出，而窄岛化布局因空间集约、车道配置灵活，成为技术升级重要方向。车道宽度缩减与岛体形态变化会改变驾驶员视觉判断及操作习惯，参数设计若不合理，可能引发急刹、偏移等风险行为，甚至造成交通事故，探究窄岛化布局对驾驶员行为的影响机理并提出科学优化方案，对提升收费站运行效能具有重要现实意义。

1 窄岛化收费站车道布局的现状

1.1 窄岛化布局的技术定义与核心特征

窄岛化收费站车道布局由传统宽岛式布局发展而来，属于空间集约型设计模式，技术核心是通过缩减收费岛体横向尺寸与车道净宽实现土地资源高效利用。从技术层面界定，岛体宽度一般控制在1.2~1.5米区间，较传统宽岛缩减比例达31.8%~45.5%；此类尺度优化以收费设备小型化、人机交互距离缩短为必要条件，需配套集成化收费终端与紧凑型安全护栏系统，通过硬件规格调整与空间布局重构，在保障收费功能完整性的同时，实现土地利用效率的提升与通行空间的集约化配置。

1.2 典型结构参数与空间配置模式

当前主流窄岛化布局采用“岛体—车道—隔离带”三位一体模块化设计，岛体结构划分为刚性基础段与

柔性过渡段，刚性基础段选用C30钢筋混凝土实施浇筑工艺，其嵌入地面深度控制在不小于30cm范围，以此确保整体结构具备抗倾覆性能；柔性过渡段采用改性沥青材料完成铺装，与周边路面形成的坡差过渡角度限制在不大于3°区间。车道标线系统采用具备雨夜反光特性的热熔涂料制作，边缘线与岛体边缘维持0.5米的安全间距，车道分界线设置宽度为10厘米的振荡标线，可借助车辆行驶过程中产生的触觉反馈，增强驾驶员对车道边界的感知效果。

1.3 现有布局的主流技术形式

基于收费模式差异，窄岛化布局衍生出ETC专用车道、MTC车道、ETC/MTC混合车道三种技术变体，ETC专用车道趋向无岛化构造，仅留存30厘米标线与防撞柱，配置5.8GHz微波天线并经12°波束角优化，能够在60km/h行驶速度下达成99.9%的识别率；MTC车道需保留收费窗口交互区域，岛体加设0.6米宽度的悬挑式操作平台，平台台面距离地面高度为1.2米，与车辆驾驶室窗台呈平行状态对接；混合车道运用ETC+收费机器人技术手段，进行ETC+自助收费，配套的毫米波雷达测速模块与LED车道指示器形成联动控制机制，通过参数协同实现不同收费模式下的车道功能切换与流量适。

2 窄岛化收费站车道布局对驾驶员行为的影响机制

2.1 视觉感知系统的畸变效应

窄岛化布局通过压缩空间尺度，改变驾驶员固有视觉参照系，进而引发视觉感知参数的系统性偏差。在标准车道设计中，净宽通常为3.5米，而窄岛化布

局实施后,多数车道宽度大幅缩减,驾驶员视野范围内的侧向余量参数显著下降,尽管出、入口位置的最外侧车道保留4.5米超宽规格,但整体布局结构导致车道边界的视觉张角缩小18.6%,直接造成周边视觉信息的采样密度降低,岛体宽度的缩减打破了传统宽岛布局建立的视觉引导基线,在50~100米的预判距离范围内,驾驶员难以借助岛体轮廓线构建稳定的空间定位锚点,视觉搜索频次较传统布局每分钟增加2.3次。紧凑型岛体与密集排布的收费设备进一步推高视觉信息熵值,当车辆接近收费窗口时,驾驶员瞳孔收缩频率提升40%,视觉聚焦切换时间延长至0.8秒,超出标准响应阈值0.3秒,反映出视觉系统应对空间压缩的应激性调整。

2.2 操作响应特性的变异规律

车道空间约束的变化直接影响驾驶员操作行为模式,形成独特的转向控制与车速调节特征,在横向操作层面,窄岛化布局使方向盘转角标准差从传统布局的 1.2° 上升至 2.8° ,转向修正频率达到1.5次/秒,其中大型车辆的转向盘转角波动幅度比小型车辆高60%,且与轮迹横向偏移量呈显著正相关(相关系数0.78),表明车辆体型越大,对窄空间的操作敏感性越强。纵向速度控制方面,驾驶员在距离收费岛50米处即开始增大车速衰减梯度,由传统布局的 0.8m/s^2 提升至 1.5m/s^2 ,减速起始点较以往提前15~20米,呈现出“早减速、缓接近”的操作模式,踏板操作表现出频次与幅度的不对称性,制动踏板平均踩踏深度增加30%,而加速踏板操作间隔延长至2.5秒,凸显驾驶员面对空间压迫时采取的防御性操作策略,通过增强制动介入与延缓加速来降低碰撞风险。

2.3 行为决策模式的重构机制

窄岛化布局通过改变驾驶任务的复杂程度,重塑了驾驶员在车道选择与路径规划过程中的决策逻辑,车道宽度的差异化设计导致驾驶员车道选择偏好出现明显分化,GPS轨迹数据分析显示,85%的小型车辆倾向于选择宽度相对较大的车道,而大型车辆受限于转向灵活性,车道选择错误率高达12%。在路径修正决策环节,驾驶员反应时延长至1.2秒,决策犹豫指数从传统布局的0.08升至0.15,反映出空间容错率降低引发的风险感知增强对决策效率的负面影响,眼动实验数据表明,驾驶员对岛体边缘的注视时长占比从传统布局的15%提升至35%,注意力资源分配的显著偏移导致其对收费设备交互信息的识别延迟0.5秒,揭示出视觉注意力过度集中于边界监控时,对关键操作信息处理的滞后效应,这种决策模式的重构本质上

是驾驶员在空间约束条件下,通过调整信息加工优先级来平衡安全与通行效率的适应性策略。

3 基于驾驶员行为的窄岛化收费站车道布局优化方案

3.1 车道宽度的分级动态适配设计

针对不同车型驾驶员操作特性差异,在维持标准车道宽度(3.5米和4.5米)基础上,通过优化收费岛体设计及配套措施实现空间高效利用与操作适配,4.5米宽车道专门设置于出、入口最外侧。标准3.5米车道宽度设定,综合95%分位相关车型车身宽度(1.8米)加双侧0.7米安全冗余计算得出。在收费岛体宽度缩减的窄岛化布局中,通过精细化设计有效保障操作空间,路缘带采用C25混凝土预制块拼接,表面进行拉毛处理,摩擦系数达到0.65,该设计在提升空间集约性同时,满足车辆转弯半径需求,将轮迹横向偏移量控制在0.2米安全阈值内,并使方向盘修正频率稳定在0.8次/秒以内。

在宽度过渡段采用1:20线性渐变斜率,总长度设定为50米,其中前30米实施缓慢扩张处理,后20米保持尺度稳定,这种连续的空间引导模式降低了驾驶员视觉感知的突变性,实测数据显示,车速衰减梯度降至 1.0m/s^2 ,接近传统宽岛布局的舒适性标准。

3.2 岛体过渡段的流线型曲面优化

岛体结构采用“刚性核心+柔性过渡”复合设计,基础段保留1.5米刚性混凝土结构承载设备荷载,混凝土抗折强度 $\geq 4.5\text{MPa}$,内置 $\Phi 12\text{mm}$ 螺纹钢筋网片,网格间距 $20\times 20\text{cm}$,在80kN竖向荷载下挠度不超1/500,过渡段采用半径50米流线型曲面结构,以改性环氧树脂复合材料浇筑,厚度8cm,与基层榫卯式连接,抗剪强度 $\geq 3.0\text{MPa}$,与路面呈 1.5° 缓坡衔接,坡长延伸至10米,车辆碾过过渡段时垂直加速度控制在0.3g以内。曲面边缘嵌入0.1米宽荧光反光条带,硫化橡胶基材包裹高折射率玻璃微珠,逆反射系数 $\geq 500\text{mcd}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{lx}^{-1}$,强化边界视觉识别,使驾驶员捕捉岛体轮廓时间缩至0.3秒,岛体与车道衔接处设置0.5米宽多孔性降噪铺装带,采用玄武岩纤维多孔沥青混合料,孔隙率18%~22%,10mm凹坑结构产生150~200Hz振动频率,当车辆轮缘接近边界0.3米时,驾驶舱振动预警,实验表明车道偏离风险降低40%,横向偏移波动减少25%。

3.3 视觉引导系统的多模态协同配置

构建“标线—灯光—标识”三位一体视觉引导体系,车道分界线使用20cm宽微棱镜型雨夜反光标线,高耐磨树脂基材内含立方体微棱镜结构,逆反射系数

$\geq 350\text{mcd}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{lx}^{-1}$, 在 -10°C 至 60°C 环境保持性能稳定, 搭配间隔5米的LED轮廓灯, IP68防护等级, 单灯功率3W, 色温5000K, 低照度环境下维持 $0.8\text{cd}/\text{m}^2$ 亮度输出, 50米内车道边界识别精度超98%。收费岛前30米设动态光带引导系统, RGB三色LED模组每米60颗灯珠, 1Hz绿色脉冲光流指示路径, 传播速度匹配30km/h建议车速, 毫米波雷达检测到车辆偏移时, 对应侧光带切换红色警示, 光强从 $50\text{cd}/\text{m}^2$ 升至 $150\text{cd}/\text{m}^2$, 促使驾驶员转向修正反应时缩短至0.6秒, 较传统设计提升40%。

3.4 设备集成模块的人机工程学布置

收费设备模块化集成设计, ETC天线、车牌识别相机、费额显示器整合为1.6米一体化立柱, Q235B钢材焊接, 热浸锌处理, 安装于岛体外侧0.8米处, 使驾驶员视线与显示屏成 15° 俯角, 信息识别准确率达99.2%。设备外壳采用860nm红外透波材料, 透光率 $\geq 90\%$, 配备自适应补光系统, 逆光环境下车牌识别率仍达99.5%。操作窗口基准高度1.2米, 与小型车驾驶室窗台平齐, 0.2米电动升降机构适配不同车型, 将驾驶员手臂操作幅度控制在 30° 以内, 降低操作分心导致的车道偏移风险, 实测操作期间车道偏移量控制在0.1米以内。

4 窄岛化收费站车道布局优化方案的应用成效

4.1 驾驶员行为规范度的量化提升

某高速公路收费站开展为期3个月实车测试, 优化方案显著规范驾驶员操作行为, 车道宽度分级设计调整后, 小型车方向盘转角标准差从 2.8° 降至 1.1° , 大型车轮迹横向偏移量均值稳定在0.15米, 较基准值下降37.5%。转向修正频率由1.5次/秒减至0.7次/秒, 操作稳定性接近传统宽岛布局, 速度控制方面, 50米区间车速衰减梯度从 $1.5\text{m}/\text{s}^2$ 放缓至 $0.9\text{m}/\text{s}^2$, 减速起始点延后8-12米, 减少过度减速造成的通行阻滞, 眼动

追踪数据显示, 驾驶员对岛体边缘注视时长占比从35%降至18%, 视觉资源分配更趋正常行驶状态。

4.2 通行效能的技术参数改善

优化方案实施后, 收费站单车道小时通行量实现结构性提升, ETC专用车道通过设备集成布置与视觉引导协同, 车辆速度维持45-50km/h, 较优化前提升12.5%, 识别成功率从98.2%升至99.8%, 误识别率控制在0.2%以下, MTC车道经人机工程学优化操作窗口, 单次交易时长从18秒压缩至14秒, 服务效率提升22.2%。高峰时段(每日8:00-10:00), 混合车道排队长度平均缩短40米, 排队消散时间减少15分钟, 在空间利用率上, 同等土地占用下, 优化后的车道配置使单位面积通行效率提升28%, 验证窄岛化布局的空间集约优势。

4.3 设备交互性能的稳定性增强

一体化设备模组应用显著降低硬件故障率, ETC天线旁瓣干扰率从3.2%降至0.5%, 信号接收灵敏度提升至 -95dBm ; 车牌识别相机在逆光环境下动态帧率稳定保持25fps, 识别响应时间缩短至0.3秒, 较优化前减少0.2秒, 自适应补光系统使夜间识别准确率维持99.3%, 较传统方案提升3.1个百分点。设备经结构优化改善散热性能, 环境温度 38°C 时, 核心部件工作温度控制在 55°C 以内, 超出传统布局耐热阈值 8°C , 连续无故障运行时间延长至1200小时。

5 结语

研究聚焦窄岛化收费站车道布局对驾驶员行为的影响, 梳理现存问题及影响机制, 形成并验证优化方案。科学布局优化能规范驾驶员行为, 提升收费站运行效能, 相关结论为窄岛化收费站设计与升级提供技术参考, 后续可结合更多实际场景细化方案, 适应复杂交通环境需求。

参考文献:

- [1] 朱永光,刘瑞海,李言,等.公路收费站窄岛及去岛化发展趋势分析[J].中国公路,2024,(17):94-97.
- [2] 李涛,何培舟,杨树林,等.高速公路服务区收费站的布局模式[J].中国公路,2025,(06):109-111.
- [3] 林静言.高速公路收费站拥堵及改善措施分析[J].广东公路交通,2022,48(05):57-62.