

基于驾驶人视觉特性的隧道车速与 照明协同控制

陈光勇¹, 周世睿², 陶楚青¹, 万利¹, 魏巍²

(1. 山东省交通规划设计院集团有限公司 隧道与地下工程设计研究院, 济南 250101; 2. 吉林大学 交通学院, 长春 130022)

摘要: 针对隧道内空间狭小、照明不足及视线受限导致驾驶人压抑紧张情绪, 进而出现“逢隧必降速”, 影响通行效率的问题, 提出了一种隧道车速与照明协同控制方法。该方法首先分析了隧道环境下驾驶人对灯光强度的视觉适应特性, 建立了不同行车速度下隧道最佳照明强度和范围计算模型, 通过优化隧道内照明变化控制方案, 降低黑白洞效应对驾驶人的干扰; 然后, 结合隧道内实际速度、车流密度等指标及突发事件等级, 设计了隧道实际运行安全速度确定方法, 并调节隧道灯光照度以适配驾驶人的安全行驶需求。最后, 采用山东省域隧道实际运行数据进行模拟验证, 结果表明, 该方法通过隧道车速与照明协同控制, 提升了隧道平均运行速度和安全效率。目前, 该方法已在山东济潍高速部分隧道开展实际应用。

关键词: 交通运输系统工程; 驾驶人特性; 隧道速度控制; 隧道照明调节

中图分类号: U458 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)12-3898-09

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240535

Collaborative control of tunnel speed and lighting based on driver's visual characteristics

CHEN Guang-yong¹, ZHOU Shi-rui², TAO Chu-qing¹, WAN Li¹, WEI Wei²

(1. Tunnel and Underground Engineering Design Branch, Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute Group Company Limited, Jinan 250101, China; 2. College of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Aiming at the problem that drivers' depression and tension are easily induced by narrow space, insufficient lighting and limited sightline in tunnels, which further leads to the phenomenon of "slowing down whenever passing through a tunnel" and thus impairs traffic efficiency, a coordinated control method for tunnel vehicle speed and lighting is proposed. First, drivers' visual adaptation characteristics to light intensity in tunnel environments are analyzed, calculation models for the optimal lighting intensity and range under different driving speeds are established, and the control scheme of lighting variation in tunnels is optimized to reduce the interference of the black hole and white hole effects on drivers. Then, combined

收稿日期: 2023-09-19.

基金项目: 山东省交通运输厅科技计划项目(KJ-2019-SDSJTT-04); 国家重点研发计划项目(2019YFB1600500).

作者简介: 陈光勇(1982-), 男, 高级工程师. 研究方向: 智慧隧道机电设施. E-mail: 51338031@qq.com

通信作者: 魏巍(1978-), 男, 高级工程师, 博士. 研究方向: 交通安全. E-mail: weiwei@jlu.edu.cn

with indicators such as actual vehicle speed and traffic density in tunnels as well as the levels of emergencies, a method for determining the safe operation speed of tunnels is designed, and the tunnel lighting illuminance is adjusted to meet the requirements of drivers' safe driving. Finally, simulation verification is carried out by using the actual operation data of tunnels in Shandong Province. The results show that the average operation speed and safety efficiency of tunnels are improved by this method through the coordinated control of tunnel vehicle speed and lighting. At present, this method has been put into practical application in some tunnels of the Jiwei Expressway in Shandong Province.

Key words: engineering of communication and transportation system; driver characteristics; tunnel speed control; tunnel lighting regulation

0 引言

隧道作为公路交通的重要组成部分,受其特殊空间结构和环境条件影响,是交通事故多发区域。其原因在于隧道空间相对狭小、隧道内外光线变换剧烈、驾驶人视野受限等。为了减少交通事故,布设限速牌、在隧道出入口搭建遮光棚是管理隧道的常用措施。但在这些措施中,隧道限速值通常远低于高速公路常规路段限速值,导致车辆经过隧道时产生“逢隧必降速”现象。因此,提高隧道车辆安全运行速度对提升公路通行效率具有重要意义。

常规的隧道速度控制方法以动态限速优化为主。例如,唐正光等^[1]基于实时车辆运行速度,分析了隧道路段车速分布特征,提出了针对性车速管控措施;田毕江等^[2]选取横向偏移值、相邻路段运行速度差、纵向加速度和速度统计指标作为限速设置条件;高欣^[3]基于运行速度开展道路隧道行车安全分析,确定了限速值;齐宏娇^[4]深入研究了隧道出入口的速度变化规律,建立了速度与隧道安全动态模型。此外,Wang等^[5]根据高速公路实时交通流状态和降雨强度,提出了动态控制策略,用于调节高速公路隧道入口车辆行驶速度。Lu等^[6]采用宏观交通流模型模拟公路瓶颈段交通流状况,实施变速限速管控。然而,现有速度优化方法主要依据车辆运动学模型、交通流状态等车辆信息进行研究,忽略了隧道降速的主要原因,即隧道环境对驾驶人生理心理的影响。

国外的一些学者^[7,8]研究发现,在照明不佳的隧道群环境下,驾驶人对信息感知的敏感性降低,注意力涣散。隧道入口段通常会采取减速措施,而在出口段时,驾驶人通常因急于驶离隧道而采取加速操作。为了减少隧道照度对驾驶人心理生

理的影响,现有研究^[9-11]通过构建隧道入口遮阳棚及其关联隧道模型,提出了隧道入口遮阳棚的设置条件和“分段单一、整体组合”式遮阳棚的渐低光环境设计方法。万利等^[12]和林志等^[13]对隧道内装饰侧墙和路面颜色进行了研究,设计的色彩视觉心理效应方案更适用于隧道环境。而现有研究主要聚焦于隧道口和隧道内的光线变化问题,忽略了驾驶人在驶入、行驶、驶出隧道过程中的心理生理状态变化。

本文综合考虑隧道内驾驶人的心理生理效应,通过调节隧道照明强度,提高隧道行车速度上限,以减小车辆通过隧道时的速度波动幅度;同时,结合速度、车流密度等指标及突发事件等级,综合确定隧道实际运行安全速度。最后,利用山东省域内隧道实际运行数据,验证本文方法的有效性。

1 隧道灯光照度控制方法

由于公路隧道内外亮度差异较大,驾驶人在驶入隧道时会产生“黑洞效应”,驶离隧道时则会出现“白洞效应”。这两种视觉适应不良现象是由于驾驶人视野范围内的光环境突然变化,而驾驶人的生理调节功能不足以应对这种剧烈变化。“黑白洞效应”会导致驾驶人无法有效获取道路信息,不能满足行车视距需求,从而产生行车安全隐患。

为提高隧道车辆运行速度上限,适配驾驶人的心理生理特性,本文根据《公路隧道照明设计细则》(JTG/T D70/2-01-2014)^[14],对隧道路段的照度进行研究和优化改进。

隧道出入口段照度的设计主要考虑驾驶人的视觉适应特性。其中,瞳孔面积变化速度可以反映驾驶人视觉负荷程度。本文研究了驾驶人瞳孔面积变化与隧道路面照度的关系,结果表明,隧道

内路面照度 $E(\text{lx})$ 与驾驶人瞳孔面积 $S(\text{mm}^2)$ 具有如下关系:

$$\log_{10}(ES) = a \log_{10} E + b \quad (1)$$

式中: a, b 均为常数。

对式(1)进行时间求导,并代入 $v = dx/dt$,可得瞳孔面积变化速度 v_e 与车辆行驶速度 v 的关系如下:

$$v_e = \frac{dS}{dt} = v \frac{dS}{dx} = 10^b(a-1)E^{(a-2)}v \frac{dE}{dx} \quad (2)$$

式中: x 为车辆位置坐标; t 为时间。

车辆行驶速度 v 可基于全息感知数据预测得到,可表示为关于 x 的函数 $v = V(x)$,于是得到:

$$10^b(a-1)E^{(a-2)}dE = \frac{v_e}{V(x)}dx \quad (3)$$

对式(3)两端进行积分运算,得到不同车速及瞳孔面积变化率要求下,隧道出入口照度与空间位置的关系,如下所示:

$$E^{(a-1)}(x) = 10^{-b}v_e \int_{x_0}^x \frac{1}{V(u)}du + E^{(a-1)}(x_0) \quad (4)$$

式中: x_0 为隧道口的位置坐标,车辆进入隧道时, x_0 取隧道入口位置;车辆驶出隧道时, x_0 取隧道出口位置。

相关研究^[14]表明,当瞳孔面积变化速度在 $[-6, 4] \text{ mm}^2/\text{s}$ 区间时,驾驶人不会发生视觉障碍。为保证行车安全,引入安全常数 c_1 ,当驾驶人视觉明适应时,取 $v_e = (-6 + c_1) \text{ mm}^2/\text{s}$;当暗适应时,取 $v_e = (4 - c_1) \text{ mm}^2/\text{s}$ 。

车辆在隧道内行驶时,需确保驾驶人前方视野的光照条件满足其观察需求,以保证驾驶人有足够的距离观察危险并执行制动操作。同时,考

虑照明系统控制灯具状态更新的时间间隔 t_c ,计算每辆车对前方照明区间的长度需求,具体计算公式如下:

$$l_a^i = \max(l_p^i, l_o^i) + l_c^i + c_2 \quad (5)$$

$$l_p^i = s_1^i + s_2^i + s_0 = v^i t_r + \frac{(v^i)^2}{2g\varphi} + s_0 \quad (6)$$

式中: l_a^i 为车辆 i 前方的照明区间长度需求; l_o^i 为车辆 i 的驾驶人观察距离,研究表明^[15],当道路曲率半径 $> 780 \text{ m}$ 时,驾驶人的预留反应时间为 3.07 s ,由此得到驾驶人观察距离 $l_o^i = 3.07v^i$; l_c^i 为照明系统控制灯具状态更新的时间间隔内车辆 i 行驶的距离, $l_c^i = v^i t_c$; c_2 为照明安全距离常数; l_p^i 为车辆 i 的停车视距; s_1^i 为驾驶人反应时间内车辆 i 行驶的距离; s_2^i 为车辆制动距离; s_0 为制动安全距离; t_r 为驾驶人反应时间; g 为重力加速度; φ 为路面与轮胎之间的纵向摩擦系数。

由此,构建隧道内灯具的控制函数,如下所示:

$$\delta^i(x) = \begin{cases} 1, & x^i - l_d < x \leq x^i + l_a^i \\ & \text{且 } x_e \leq x \leq x_o \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中: δ^i 为车辆 i 对应的灯具控制状态函数, $\delta^i(x) = 1$ 表示位于 x 处的灯具需要启亮,反之则熄灭; x^i 为车辆 i 的位置; l_d 为车辆后方照明区间长度,用于保证车辆周边照明,缓解驾驶人在行车过程中的焦虑情绪,设为常数; x_e 为隧道入口位置; x_o 为隧道出口位置。

隧道内车辆照明范围需求示意图如图 1 所示。

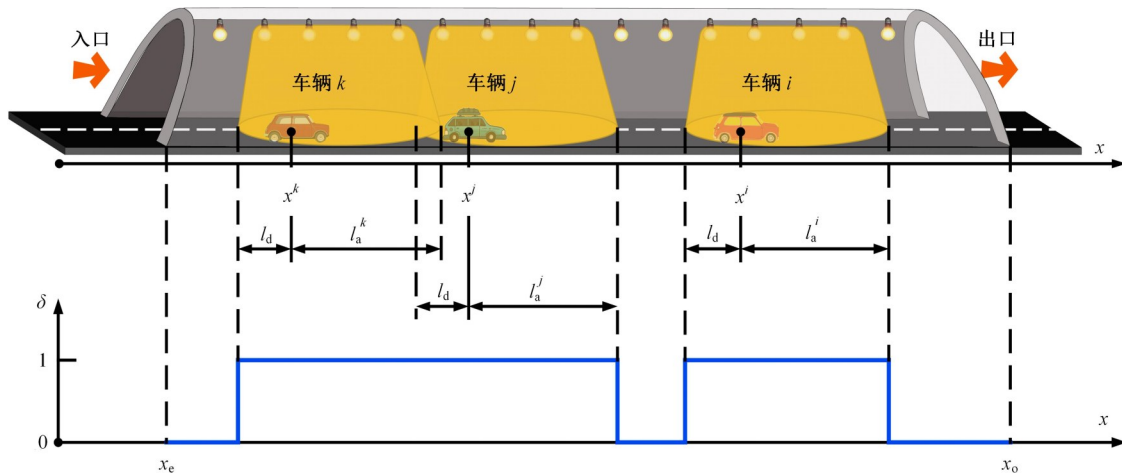


图 1 照明范围需求示意图

Fig. 1 Schematic diagram of lighting range requirements

2 隧道实际运行安全速度确定方法

在隧道自由流状态下,通过调节隧道灯光照度以适配驾驶人的生理效应,能够有效提高车辆行驶速度。但在实际场景中,车辆运行会受周围车辆、异常事件等因素影响,进而限制车辆安全行驶速度的提升。为了确定不同交通状态下隧道的实际运行安全速度,本文将交通状态作为约束条件,确定隧道实际运行安全速度上限,建立高速公路隧道速度提升控制的目标函数。通过编程软件求解模型,得到当前交通状态下的安全车速,并通过调节隧道灯光照度以适配驾驶人的驾驶需求。实际管控中,在车流量较小或无车的时段,可降低灯光亮度,关闭部分灯光,在保证基本照明需求的同时实现能源节约。

2.1 速度提升优化控制目标函数

针对高速公路隧道内的交通情况,通过交通流模型进行预测,以下一个时段的可变限速值作为输出结果。在确定隧道速度提升策略时,以车辆通过效率最优(延误时间最短)为目标函数,同时将各项安全性能指标作为约束条件,具体步骤如下所示。

(1)交通流模型预测:基于历史数据和交通流模型预测隧道内下一时段的交通流量、速度分布等运行参数。

(2)目标函数建立:建立目标函数,以车辆通过效率最优(延误时间最短)为目标,通过最小化车辆平均行程时间实现。

$$\min \sum T_i(k) \quad (8)$$

式中: $T_i(k)$ 为路段*i*需要通过的延误时间。

(3)约束条件:将各项安全性能指标作为约束条件,如控制车辆速度差异在合理范围、最小化事故风险等。约束条件可以根据隧道的特点和实际情况确定。

(4)速度提升策略:结合优化算法和交通流模型的预测结果确定隧道内的最大限速值,在满足约束条件的前提下实现目标函数最优。

通过上述步骤,建立动态速度提升方法,在保证通行安全的基础上最大化车辆通过效率,提高隧道内交通运行的效率和安全性。

2.2 速度提升优化控制约束条件

高速公路隧道本身特性的约束条件如下:首先,在实行速度控制的时间范围内,各路段的平均速度需小于设计车速,且路段内的车流密度不能

超过阻塞流的密度。具体约束条件如下:

$$0 \leq v_i(k) \leq v_f \quad (9)$$

$$0 \leq \rho_i(k) \leq \rho_{jam} \quad (10)$$

式中: $v_i(k)$ 为*kT*时刻车辆的平均速度; v_f 为自由流速度; $\rho_i(k)$ 为*kT*时刻车流密度; ρ_{jam} 为阻塞流密度。

其次,相邻段同一时间和同一段相邻时间的速度和密度差不宜过大,若大幅度地改变车速,则易引起车辆追尾事故,因此在制定调节速度策略时,需要对相邻两个时间段内的速度差值进行规定。

$$0 \leq |\rho_i(k+1) - \rho_i(k)| \leq \Delta \rho_{max} \quad (11)$$

$$0 \leq |\rho_i(k) - \rho_{i-1}(k)| \leq \Delta \rho_{max} \quad (12)$$

$$0 \leq |v_i(k+1) - v_i(k)| \leq \Delta v_{max} \quad (13)$$

$$0 \leq |v_i(k) - v_{i-1}(k)| \leq \Delta v_{max} \quad (14)$$

$$v_i(k+1) = v_i(k) g \frac{\rho_i(k)}{\rho_i(k+1)} \quad (15)$$

$$v_{i+1}(k) = v_i(k) g \frac{\rho_i(k)}{\rho_{i+1}(k)} \quad (16)$$

根据国外学者大量的实例研究,Solomon^[16]得到速度离散性与事故数关系如图2所示,说明速度离散性越大,事故数越多。

车辆的速度与密度存在一定的比例关系^[17],如图3所示,因此控制速度等于控制密度。

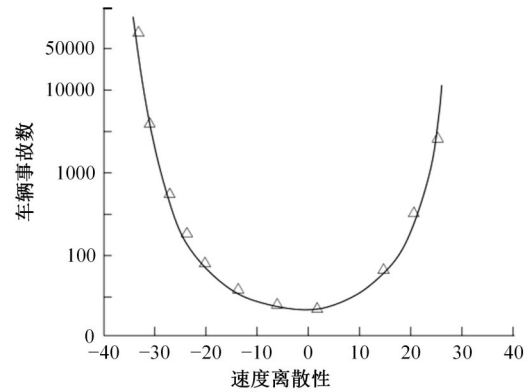


图2 事故数与速度离散性关系图

Fig. 2 Diagram of accident number and speed dispersion

为了研究隧道内车流的运行状态,本文选用宏观交通流模型中的METANET模型^[18]。该模型是MACK模型的离散化形式,属于时空离散方程,具有结构简单、计算方便的特点。

本文将隧道分割成 N_m 段,第*i*段路段的长度为 L_m ,车道数为 λ_m ,*kT*时刻的密度为 $\rho_{m,i}(k)$,平均速度为 $v_{m,i}(k)$,驶入流量为 $q_{m,i-1}(k)$,驶出流量

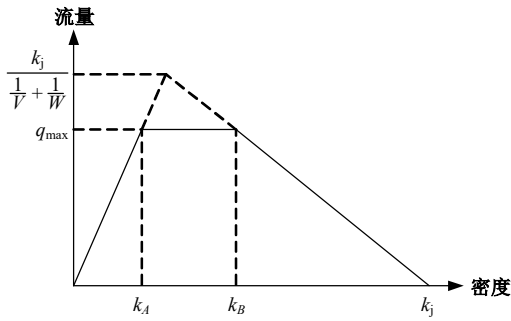


图 3 交通流量密度模型

Fig. 3 Traffic flow-density model

为 $q_{m,i}(k)$, 路段自由流速度为 v_{lm} , 路段车道的临界密度为 ρ_c , 待计算的常数参数包括 a_m 、 τ 、 η 、 κ 。其中 κ 的引入是为了避免当密度 $\rho_{m,i}(k)$ 较小时, 模型计算出现数值不准确的问题。

$$\rho_{m,i}(k+1) = \rho_{m,i}(k) + \frac{T}{L_m \lambda_m} [q_{m,i-1}(k) - q_{m,i}(k)] \quad (17)$$

$$q_{m,i}(k) = \rho_{m,i}(k) \cdot v_{m,i}(k) \cdot \lambda_m \quad (18)$$

$$v_{m,i}(k+1) = v_{m,i}(k) + \frac{T}{\tau} (V(\rho_{m,i}(k)) - v_{m,i}(k)) + \frac{T}{L_m} v_{m,i}(k) (v_{m,i-1}(k) - v_{m,i}(k)) - \frac{\eta T}{\tau L_m} \frac{\rho_{m,i+1}(k) - \rho_{m,i}(k)}{\rho_{m,i}(k) + \kappa} \quad (19)$$

$$V(\rho_{m,i}(k)) = v_{lm} \cdot \exp \left[-\frac{1}{a_m} \left(\frac{\rho_{m,i}(k)}{\rho_c} \right)^{a_m} \right] \quad (20)$$

进一步用可量化模型完善流量占有率模型。 $b_m(k)$ 当前为应用的可变限速值和原恒定限速值的比值。流量占有率模型可量化为:

$$v'_{lm} = v_{lm} \cdot b_m(k) \quad (21)$$

$$\rho'_c = \rho_c \cdot \{1 + A_m \cdot [1 - b_i(k)]\} \quad (22)$$

$$\alpha'_m = \alpha_m \cdot [E_m - (E_m - 1) \cdot b_i(k)] \quad (23)$$

式中: A_m 、 E_m 均为常数参数, 需根据实际数据进行估计; $b_i(k)$ 为 k 时刻最优的速度值。

通过对高速公路隧道进行时间和空间划分, 建立交通流运行模型。

上述模型中, 路段 $i-1$ 驶出的车辆数量取决于路段 $i-1$ 后半部分的车辆数量和路段 i 可接受的最大车辆数量; 路段 i 驶入的车辆数量取决于路段 i 前半部分的车辆数量和路段 $i-1$ 可驶出的最大车辆数量。流量 $y_i(t)$ 为路段 i 在 t 时刻驶出的交通量, 受各路段速度限制的影响, 决定了路段 i 的输出容量和路段 $i+1$ 的接受容量, 是反映小区

间交通流动态传播过程的重要参数, 其取值受当前路段和下游路段的共同影响, 具体分为以下 3 种情况。

当路段 i 和路段 $i+1$ 处于自由流状态时, 上游路段的车辆速度调整到下游路段的平均速度, 然后进入下游路段。

$$y'_i(t) = \min \{v_{i+1} \rho_i \lambda_i, v_i\} \quad (24)$$

当路段 $i+1$ 处于拥挤状态时, 路段 i 的车辆减速到路段 $i+1$ 的平均速度, 然后进入下游路段。

$$y_i^*(t) = \min \{v_i \rho_i \lambda_i, v_{i+1} \rho_i \lambda_i\} \quad (25)$$

当路段 i 拥挤、路段 $i+1$ 畅通时, 上游路段的车辆加速到下游路段的平均速度, 然后进入下游路段。

$$y_i^*(t) = \min \{ \max(v_i, v_{i+1}) \rho_i \lambda_i, v_{i+1} \rho_i \lambda_i \} \quad (26)$$

$$\rho_i(t+1) = \rho_i(t) + \frac{\Delta T [y_{i-1}(t) - y_i(t)]}{\lambda_i l_i} \quad (27)$$

$$q_i(t+1) = \begin{cases} v_i \rho_i(t+1), & 0 < \rho_i(t) < \rho_i \\ q_{\max} \left(1 - \frac{\rho_i(t+1) - \rho_{c,i}}{\rho_{\text{jam}} - \rho_{c,i}} \right), & \rho_{i,c} < \rho_i(t) < \rho_{\text{jam}} \end{cases} \quad (28)$$

$$v_i(\rho_i(t+1)) = \begin{cases} v_i, & 0 < \rho_i(t) < \rho_{i,c} \\ v_i \left(1 - \frac{\frac{\rho_{\text{jam}}}{\rho_i(t+1)} - 1}{\frac{\rho_{\text{jam}}}{\rho_{c,i}} - 1} \right), & \rho_{i,c} < \rho_i(t) < \rho_{\text{jam}} \end{cases} \quad (29)$$

2.3 交通异常状态下的速度控制方法

隧道环境昏暗、路段相对封闭, 发生突发事件易导致交通拥堵, 甚至交通瘫痪。隧道突发事件^[19,20]主要分为交通事故、火灾事故、危险化学品事故 3 类。不同类型的突发, 其事件参与救援的部门有所不同。根据公安部《道路交通事故等级划分标准》《火灾统计管理规定》《劳动部(60)中劳护久字第 56 号》中危化品事故危害分级要求, 将隧道突发事件分为危险、一般、轻微 3 个等级, 如表 1 所示。在检测到隧道路段有突发事件时, 应采取主动防控措施以降低事故风险。

突发事件会造成车道数减少, 从而形成隧道瓶颈区, 如图 4 所示。

为了有效控制瓶颈区交通, 需分析该区域的

表 1 隧道突发事件分级

Table 1 Tunnel emergency classification

事件严重等级	事件严重程度	事件影响范围
危险事件	发生火灾、爆炸、危险品泄漏、死伤事故等,需要紧急救援,造成经济损失和社会影响	隧道交通阻断
一般事件	发生受伤事故、车辆刮擦等,无人员伤亡或仅有轻微受伤	隧道部分车道受阻
轻微事件	车辆故障抛锚、车上物品掉落等,存在交通事故隐患	影响隧道部分车流

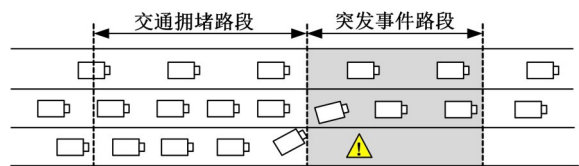


图 4 隧道突发事件瓶颈区

Fig. 4 Tunnel emergency bottleneck area

交通流运行特点。瓶颈区的流量 q_p 由紧邻上游路段的密度 ρ_{i-1} 决定。隧道内正常路段的原始通行能力为 C ,发生事故后理论通行能力为 C_p 。当上游流量大于突发事件路段的通行能力时,将产生排队现象,队列向上游蔓延。同时,受变道等行为的影响,实际通行能力通常低于理论通行能力。瓶颈区的交通流量为:

$$q_p=\begin{cases} V_{i-1}\rho_{i-1}, & \rho_{i-1}\leqslant\rho_c \\ (1-\mu)C, & \rho_{i-1}>\rho_c \end{cases} \quad (30)$$

式中: μ 为通行能力下降幅度。

因此,突发事件下瓶颈区的交通流速度为:

$$v_i(k)=\begin{cases} v_t, & \rho_i<\rho_c \\ \frac{(1-\mu)C}{\rho_c}, & \rho_i\geqslant\rho_c \end{cases} \quad (31)$$

为了缓解瓶颈区的交通压力,需对其上游路段实施速度管理,并调控隧道内照明设施以适配行车速度,从而便于驾驶人观察瓶颈区的交通状况,及时调整行车间距。针对不同等级的隧道突发事件,制定相应的管控策略,3个等级突发事件的控制策略如表2~表4所示。

表 2 危险事件等级控制策略

Table 2 Hazard event level control strategy

突发事件状态	交通信号灯	可变限速标志	车道指示器
事故初始	红灯	关闭	车道关闭
事故救援	红灯	关闭	车道关闭
事故恢复	黄闪	动态值	车道开启

表 4 轻微事件等级控制策略

Table 4 Minor incident level control strategy

突发事件状态	交通信号灯	可变限速标志	车道指示器
事故初始	黄闪	动态值	车道开启
事故救援	黄闪	动态值	事故车道关闭,非事故车道正常开启
事故恢复	黄闪	动态值	车道开启

表 3 一般事件等级控制策略

Table 3 General event level control strategy

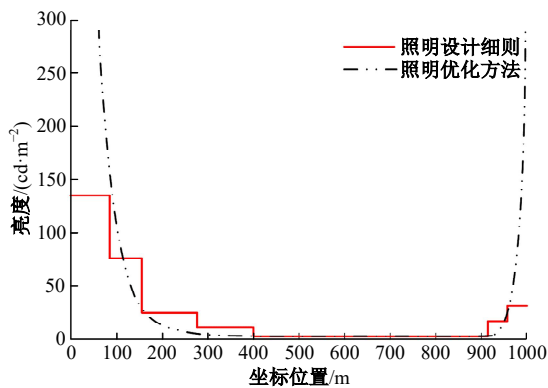
突发事件状态	交通信号灯	可变限速标志	车道指示器
事故初始	黄闪	关闭	车道开启
事故救援	红灯	关闭	车道关闭
事故恢复	黄闪	动态值	车道开启

3 实验验证

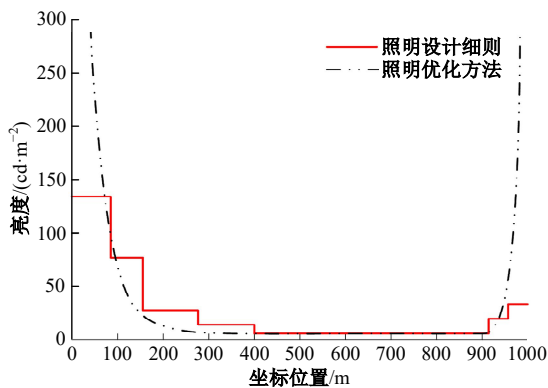
3.1 隧道速度提升效果分析

选取山东省济潍高速某隧道为测试对象,该隧道为双向四车道,全长1 000 m。实验在隧道洞外亮度为3 500 cd/m²、交通流量为1 200 pcu/h的条件下,以车辆通行速度120 km/h为目标,对隧道进行照明优化设计,得到隧道路面亮度曲线。

图5为各交通状态下本文方法及分段式隧道



(a)1 200 veh/(h·ln),100 km/h



(b)1 200 veh/(h·ln),120 km/h

图 5 隧道照明曲线

Fig. 5 Tunnel lighting curve

照明曲线。在本文方法照明曲线的计算过程中,取常数 $a=0.854$ 、 $b=1.157\ 45$,明适应瞳孔面积变化速率为 $-3\text{ mm}^2/\text{s}$,暗适应瞳孔面积变化速率为 $1\text{ mm}^2/\text{s}$ 。

优化后的照明曲线连续平滑,相比分段式控制方法,可以更好地适应人眼视觉适应特性,能够有效避免因照明强度突变引发的视觉障碍,保障行车安全。同时,根据车辆行驶速度的差异,隧道出入口段照明呈现不同的亮度曲率变化,在保证行车安全的同时使驾驶人能够尽快适应隧道内的低照明环境。

隧道内灯光控制能够快速帮助驾驶人适应新场景,缓解其心理压力。然而,在实际运行中,车辆速度会受道路线型、交通状态等因素影响。山东济潍高速隧道通常采用固定照明和固定限速控制措施,导致车辆速度在 80 km/h 左右波动,如图 6 所示。而改进后的隧道通过调节隧道内照度并实施动态限速策略,使车辆速度分布情况得到显著改善,车辆运行速度明显提升,如图 7 所示,通过照明优化能够实现隧道不降速通行。

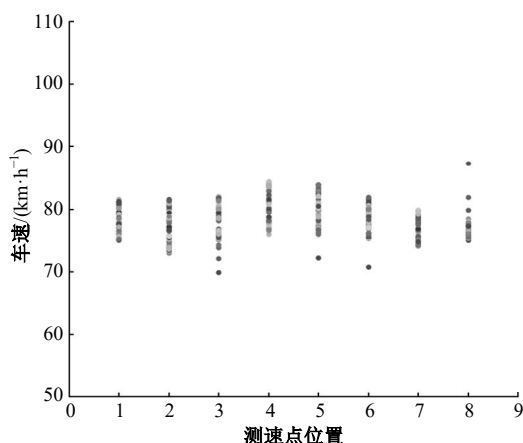


图 6 车辆当前速度分布

Fig. 6 Current vehicle speed distribution

车辆在驶入隧道前,驾驶人会降低车速以适应隧道内视线不佳的环境,导致隧道内与隧道外的行驶速度存在差值,且不同驾驶风格使车辆间速度离散性较大,易引发交通拥堵甚至交通事故。增强隧道内的灯光亮度后,隧道内的视线变远,在进入隧道后驾驶人可以逐步提升行车速度,这样不仅能提高隧道区域内车辆整体运行效率,还能减小速度离散性。

3.2 隧道交通异常状态下速度控制效果分析

通过调节隧道内的照度可提高车辆的运行速度。在自由流状态下,不对隧道运行速度进行干

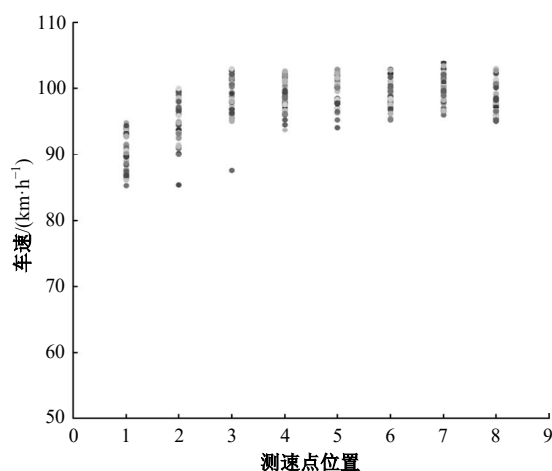


图 7 改进的车辆速度分布

Fig. 7 Improved vehicle speed distribution

预;但当交通状态发生突变时,需计算其实际运行安全速度,并采用动态限速管控以提高运行安全和通行速率。为验证安全速度计算方法的有效性和限速控制的应用效果,通过仿真软件模拟济潍高速某隧道的交通异常状态,假设交通流量为 $1\ 200\text{ pcu/h}$,统计时段间隔为 3 min ,大型车占比为 30% ,其余为小汽车,车道宽度为 3.75 m ,仿真时长为 $3\ 600\text{ s}$,隧道仿真模板如图 8 所示。



图 8 隧道仿真模拟

Fig. 8 Tunnel simulation

初始时刻在隧道中间位置发生轻微突发事件,造成交通阻塞,图 9 为未采取限速管控策略的仿真结果,图 10 为采取限速管控策略的仿真结果。具体管控流程为:在隧道上游发布隧道交通状况和预警信息,提醒驾驶人注意安全;在隧道口实施交通管制措施,限制车辆进入隧道,规范驾驶行为,确保隧道内部通道畅通;在隧道内部实施交通疏导措施,封闭相关道路,引导车辆有序通行,避免交通拥堵和事故发生。

实验结果主要从行驶速度变化(见图 11)和平均延误时间(见图 12)进行分析。结果表明,隧道内发生突发事件后,车辆速度波动较大,延误时间明显增加;而在车辆类型混合的交通流中,实施速度动态管控策略可以有效缩短车辆延误时间,

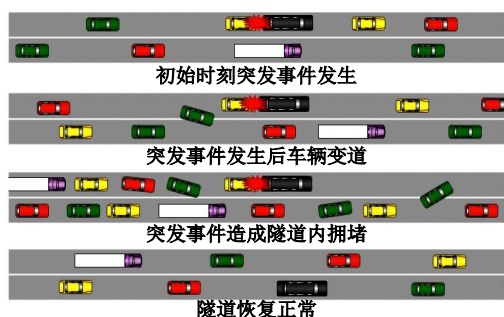


图 9 未采取管控策略

Fig. 9 No control strategy adopted

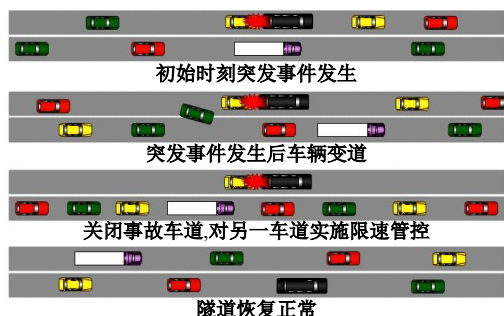


图 10 采取管控策略

Fig. 10 Adopt control strategy

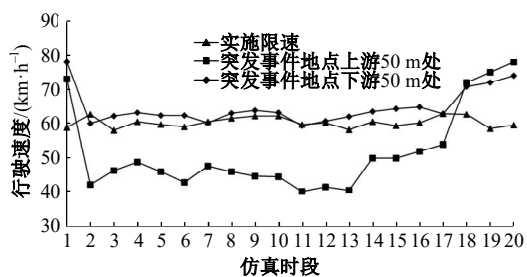


图 11 隧道内发生突发事件车辆行驶速度变化对比

Fig. 11 Comparison of vehicle speed changes when emergencies occur in tunnel

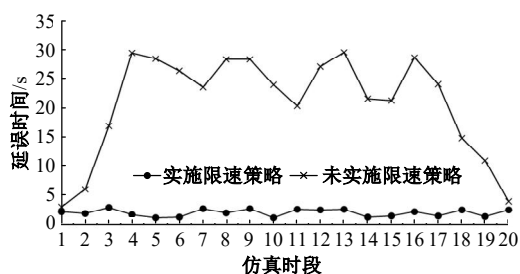


图 12 隧道发生突发事件车辆平均延误时间对比

Fig. 12 Comparison of average vehicle delay time when emergencies occur in tunnel

使车辆速度保持稳定,道路安全性逐步提高。

4 结束语

本文通过建立不同行车速度下隧道最佳照明强度和范围计算模型,优化隧道内照明变化控制

方案;同时,结合隧道内实际速度、车流密度等指标及突发事件等级,设计隧道实际运行安全速度确定方法,并通过调节隧道灯光照度以适配驾驶人安全行驶需求。该方法已在济潍高速部分隧道得到应用,实现了车辆通过隧道不降速的目标,整体运行效率得到提升,为隧道高效通行提供了可靠的数据支撑。需要说明的是,该方法仅考虑了照度对驾驶人心理状态的影响,未来可以考虑引入隧道色彩设计等视觉信息,进一步提升隧道行驶速度,进而提高隧道的运营水平。

参考文献:

- [1] 唐正光,付用国,董文武,等. 高速公路隧道路段车速特性分析[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2020, 39(6): 25-32.
Tang Zheng-guang, Fu Yong-guo, Dong Wen-wu, et al. Analysis of speed characteristics in highway tunnel sections[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2020, 39(6): 25-32.
- [2] 田毕江,胡澄宇,杨文臣,等. 基于驾驶模拟技术的山区高速公路桥隧群区限速值分析[J]. 公路, 2022, 67(1): 240-247.
Tian Bi-jiang, Hu Cheng-yu, Yang Wen-chen, et al. Analysis of speed limit values for bridge and tunnel clusters on mountainous highways based on driving simulation technology[J]. Highway, 2022, 67(1): 240-247.
- [3] 高欣. 基于运行速度的城市道路隧道行车安全分析及对策研究[D]. 重庆:重庆交通大学交通运输学院, 2023.
Gao Xin. Research on driving safety analysis and countermeasures of urban road tunnels based on operating speed[D]. Chongqing: College of Traffic and Transportation, Chongqing Jiaotong University, 2023.
- [4] 齐宏娇. 基于照明亮度和行车速度影响的隧道出入口视距研究[D]. 重庆:重庆交通大学交通运输学院, 2023.
Qi Hong-jiao. Research on sight distance at tunnel entrances and exits based on the influence of illumination brightness and driving speed[D]. Chongqing: College of Traffic and Transportation, Chongqing Jiaotong University, 2023.
- [5] Wang B T, Guang X P, Zhou Q H, et al. Control method of variable speed limits at the freeway tunnel entrance under rainy weather[C]//19th COTA International Conference of Transportation Professionals,

- Restion, Virginia, USA, 2019: 3626-3635.
- [6] Lu X Y, Varaiya P, Horowitz R, et al. A new approach for combined freeway variable speed limits and coordinated ramp metering[C] //13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Madeira Island, Portugal, 2010: 491-498.
- [7] Omer V D B, Vrana S R. Repetition and boredom in a perceptual fluency/attributional model of affective judgements[J]. *Cognition & Emotion*, 1998, 12(4): 533-553.
- [8] Zhen Y, Guo Z Y. Research on speed alteration at entrance and exit of tunnel[J]. *Shanghai Highways*, 2006, 1: 48-51.
- [9] 于亚敏. 公路隧道入口“黑洞”效应的数值表征与遮阳棚光环境设计方法[D]. 西安: 长安大学运输工程学院, 2020.
- Yu Ya-min. Numerical characterization of the "black hole" effect at highway tunnel entrances and design method of light environment for sunshades[D]. Xi'an: College of Transportation Engineering, Chang'an University, 2020.
- [10] 冯锐. 高速公路隧道(群)出入口光伏遮阳棚设计关键技术研究[D]. 西安: 长安大学运输工程学院, 2023.
- Feng Rui. Research on key technologies of photovoltaic sunshade design at entrances and exits of expressway tunnels (groups)[D]. Xi'an: College of Transportation Engineering, Chang'an University, 2023.
- [11] 唐鹏飞. 基于驾驶人视点照度的公路隧道入口遮阳棚设计方法[D]. 西安: 长安大学运输工程学院, 2019.
- Tang Peng-fei. Design method of sunshades at highway tunnel entrances based on drivers' viewpoint illuminance[D]. Xi'an: College of Transportation Engineering, Chang'an University, 2019.
- [12] 万利, 张长安, 李璟, 等. 隧道彩色路面和侧墙设计对驾驶行为的影响分析[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(增刊1): 25-34.
- Wan Li, Zhang Chang-an, Li Jing, et al. Analysis of the impact of tunnel colored road surface and side wall design on driving behavior[J]. *Chinese Journal of Safety Sciences*, 2023, 33(Sup. 1): 25-34.
- [13] 林志, 李佳奇, 赵耀, 等. 隧道路面颜色对行车安全的影响研究[J]. *重庆交通大学学报: 自然科学版*, 2022, 41(7): 34-38.
- Lin Zhi, Li Jia-qi, Zhao Yao, et al. Study on the influence of tunnel road surface color on driving safety[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition)*, 2022, 41(7): 34-38.
- [14] JTG/T D70/2-01-2014. 公路隧道照明设计细则[S].
- [15] 郑雪莲, 李显生, 任园园, 等. 基于视觉特性的驾驶人预瞄时间建模[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(5): 160-166.
- Zheng Xue-lian, Li Xian-sheng, Ren Yuan-yuan, et al. Modelling of driver's preview time based on visual characteristics[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(5): 160-166.
- [16] Solomon D. Accidents on main rural highways related to speed, driver, and vehicle[C] //Federal Highway Administration, Washington, DC, USA, 1964: 76-82.
- [17] Erwin W, Spaan Matthijs T J, Bram B. Traffic flow optimization: a reinforcement learning approach[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2016, 52: 203-212.
- [18] Messner A, Papageorgiou M. METANET: a macroscopic simulation program for motorway networks[J]. *Traffic Engineering & Control*, 1990, 31(8/9): 466-470.
- [19] 吕月娟. 公路隧道突发事件的应急制度研究[D]. 西安: 长安大学人文学院, 2017.
- Lu Yue-juan. Research on emergency systems for unexpected events in highway tunnels[D]. Xi'an: College of Humanities, Chang'an University, 2017.
- [20] 崔瑾, 赵海涛, 张程玮. 高速公路隧道交通事件分类及响应措施[J]. *公路*, 2022, 67(7): 321-325.
- Cui Jin, Zhao Hai-tao, Zhang Cheng-wei. Traffic incident classification and response measures in expressway tunnel[J]. *Highway*, 2022, 67(7): 321-325.