

胡明伟^{1,2,3,4} 吴雯琳² 田卿燕^{5,6} 郭忠鑫² 杨文杰²

基于驾驶模拟的隧道照明对行车安全及舒适度评价影响研究

摘要

随着交通运输基础设施建设发展模式由追求速度规模向更加注重质量效益转变,精细化、因地制宜地设定隧道照明环境需求日益增多。隧道照明系统设计应以保证驾驶员行车的安全性与舒适度为前提,因此需要对隧道照明如何影响驾驶员隧道行车的安全性与舒适度进行量化评估。基于隧道照明理论和驾驶员行车基础研究,选取影响驾驶员安全性与舒适度的8项指标,建立驾驶员安全性与舒适度评价体系,并通过隧道驾驶仿真环境与硬件设施实现室内仿真研究;基于UC-win/Road软件建立隧道虚拟仿真模型,通过驾驶模拟器和生理仪器获取8项指标对应的数据,对数据进行处理后通过熵权法确定指标权重,评估不同照明亮度与色温环境下的隧道安全性与舒适度,以驾驶员的行车安全及舒适评价价值最优为目的,得出隧道内亮度和色温的最佳设定值。实验结果验证了驾驶员行车安全与舒适度评价体系的有效性,提出了改进的照明方案,为隧道运营方提供参考。

关键词

隧道照明;驾驶模拟;虚拟仿真;行车安全;舒适度;评价模型

中图分类号 U492.8

文献标志码 A

收稿日期 2023-07-29

资助项目 广东省重点领域研发计划(2022B0101070001)

作者简介

胡明伟,男,博士,教授,主要研究方向为智慧交通、智慧城轨、复杂系统建模与仿真。
humw@szu.edu.cn

0 引言

随着交通强国战略的不断推进,我国道路隧道的建设和发展不断加快。2022年,全国公路隧道24 850处、2 678.43万延米。其中:特长隧道1 752处、795.11万延米,与2021年相比,增长率分别为9.6%和10.9%;长隧道6 715处、1 172.82万延米,与2021年相比,增长率分别为8.1%和8.2%^[1-2]。隧道在结构上与一般城市道路有显著区别,其车道狭窄、光线不足等特点加大了驾驶员行车过程中获取环境信息的难度,而适宜的灯光环境是保障行车安全的必要条件。交通运输部发布的《公路隧道照明设计细则》(JTG/T D70/2-01—2014)^[3]规定超过100 m的公路隧道需要设置人工照明。

尽管国内外隧道设计标准给出了隧道照明亮度的建议值及推荐的计算方法,但隧道照明系统的设计受到现实环境多方面因素的影响和制约,促使学者针对特定情境或特定区段的隧道照明效益进行研究。Adrian^[4]提出了等效光幕概念,量化驾驶员在隧道口附近路段降低的视觉功效,通过分析和计算得到接近隧道时的实际适应亮度;Zhang等^[5]利用DIALux模拟软件,分析了隧道入口内外不同季节和气候条件下的自然光照强度以及隧道入口处光照条件随距离的变化,优化了公路隧道入口处的照明环境;杜峰等^[6]通过视觉功效法实验,得到了隧洞入口段灯光安全阈值,以及与环境色温的关联性;贺占跃等^[7]通过对实际洞外亮度变化的分析,得到了最优的调光方法优化公路隧道入口段照明;Liao等^[8]提出一种带有自由表面二次透镜的LED对光束产生目标反向光束以提高公路隧道表面亮度的方法,进而提升隧道的安全性和能效。

隧道人工照明系统首先要保证驾驶员行车安全性与舒适度,现有研究主要分析驾驶员生理数据与行车安全及舒适度之间的关联性,如:Luo等^[9]首先分析了驾驶者属性对驾驶安全的影响,随后运用模糊理论分析影响驾驶安全的三个主要因素;Wang等^[10]收集了不同生理特征的乘客的车辆运动参数和驾驶舒适度主观评价,确定了影

1 深圳大学 极端环境岩土和隧道工程智能建养全国重点实验室,深圳,518060

2 深圳大学 土木与交通工程学院,深圳,518060

3 滨海城市韧性基础设施教育部重点实验室(深圳大学),深圳,518060

4 深圳大学 未来地下城市研究院,深圳,518060

5 广东省隧道工程安全与应急保障技术及装备企业重点实验室,广州,510550

6 广东华路交通科技有限公司,广州,510420

响乘客舒适性评价的因素;宋建忠^[11]分析了影响驾驶员行车安全的驾驶性格、集中度等的心理因素,并指出行车过程中心理因素与生理因素相互影响并相互作用,共同影响驾驶员的行车安全;罗杰等^[12]通过驾驶员心率变异性分析光环境负荷程度,得到不同种类光学隧道中驾驶员的心理差异性;何世永等^[13]和梁波等^[14]通过隧道照明设置、隧道内外部环境、驾驶员的反应时间、生理负荷、视觉功效等,多角度研究了隧道内的安全驾驶问题。

已有研究大多集中于隧道出入口段照明亮度对驾驶员的影响,而对于中间段照明的研究较少.实验方式方面,通常以建成的实际隧道作为研究对象开展照明质量分析研究,照明系统变量的可调节性有限;评估模式方面,大多是对驾驶安全性或舒适度中的某一项或某一类指标进行分析研究,鲜有对驾驶安全性和舒适度的综合评价.本文基于现有隧道照明理论和驾驶员行车基础研究,建立城市隧道照明仿真模型,把隧道照明亮度、照明色温作为隧道照明系统模型变量,将驾驶员驾驶行为指标、生理指标、视觉指标作为评价驾驶安全舒适性的指标,并基于仿真环境开展室内驾驶模拟实验,全面系统地研究隧道中间段照明对驾驶员隧道行车的影响。

研究框架如图 1 所示。

1 隧道照明理论和驾驶员行车基础研究

1.1 隧道照明理论

1.1.1 隧道照明系统光环境

光的度量指标主要包括发光强度、亮度、色温等.发光强度表示光源在固定方向上单位立体角内

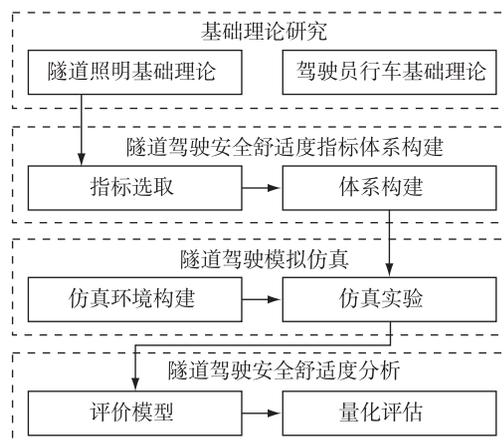


图 1 研究框架

Fig. 1 Research framework

的光通量.亮度表示人眼感受到物体表面的明亮程度,用字母 L 表示,单位是 cd/m^2 .亮度的定义如下:

$$L = \frac{dI}{\cos \theta dA}$$

其中: I 为光强; $\cos \theta dA$ 表示发光面的投影面积.色温用热力学温度表示.黑体在不断加热过程中会逐渐由红变为橙、黄、白,最后发出蓝白光,色温关系如图 2 所示。

隧道照明色温对驾驶员视觉有较大影响.当色温在 3 000 K 以下时,显示的颜色为橙红色、黄色;当色温在 3 000~5 500 K 之间时,呈现颜色为白光;当色温在 5 500 K 以上时称为冷光,此时呈现的颜色为蓝白光。

1.1.2 隧道照明区段划分

考虑到隧道建设标准以及人眼视觉系统的特

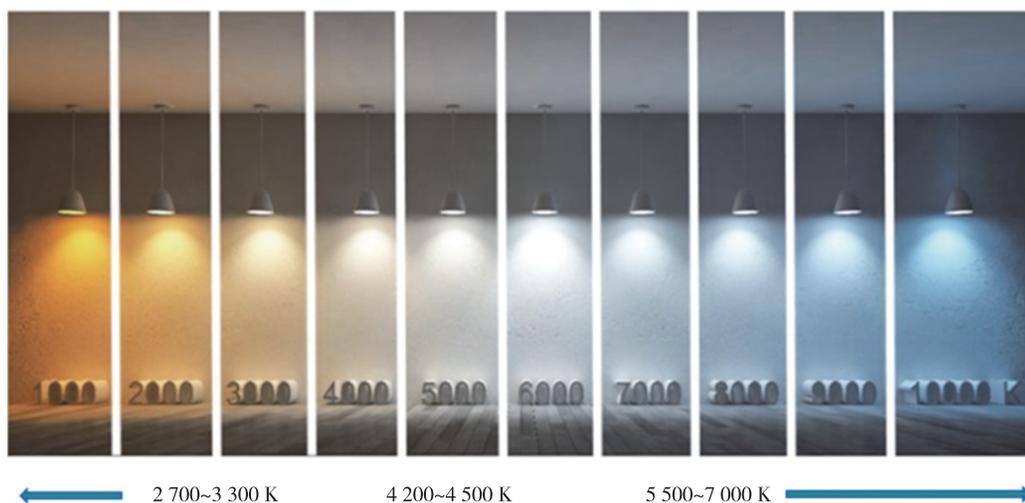


图 2 色温关系

Fig. 2 Relationship between illuminance/color temperature

点,隧道内存在不同等级的亮度需求。《公路隧道照明设计细则》^[3]将隧道划分为接近段、入口段、过渡段、中间段和出口段 5 个区段,并给出了各区段长度计算公式。区段划分示意如图 3 所示。

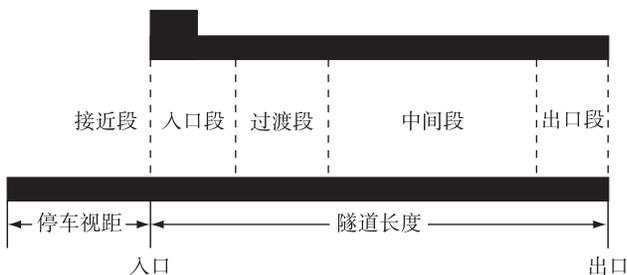


图 3 隧道照明区段划分示意

Fig. 3 Schematic of tunnel lighting section division

1.2 驾驶员行车基础理论

1.2.1 人眼视觉特性

驾驶员在感知获取隧道交通环境信息时的眼动行为主要有注视、扫视两种。通过眼动研究可以了解驾驶员在驾驶中对道路和交通环境的关注程度、信息获取方式和信息处理效率。相关研究^[15-17]表明,隧道驾驶过程中驾驶员自身的生理特性是影响行车安全的最主要因素,约 90%的道路交通信息都是通过视觉获取的,人眼的生理结构、识别机制等,对驾驶员隧道明暗适应、行车安全有重要影响。驾驶员的视觉特性数据可反映驾驶员在整个隧道行车过程中的安全与舒适程度。在隧道行驶过程中,人眼为适应隧道长度和环境变化,驾驶员瞳孔面积会较隧道外有所增大,注视和扫视物体的时间也会发生变化。因此,本研究选择瞳孔面积变化率、平均注视时间和扫视速度 3 个指标,作为评判驾驶员自身因素中的视觉能力对隧道驾驶安全舒适性的影响。

1.2.2 驾驶生理特性

驾驶员生理是指驾驶员的个性生理特征以及在驾驶工作状态下的精神活动。驾驶员行车过程中需要处理大量的信息,包括道路标志、标线、交通流等,同时还需要维持对车辆的控制,其生理特性会受到多重因素的影响,而生理特性变化又会反向影响驾驶行为。在隧道行驶过程中,受隧道行车周边环境和道路车流的影响,驾驶员容易出现紧张、恐惧等情绪,表现为进入隧道路段会心跳加速、呼吸急促等,而驾驶员存在这样的心理时将更容易造成交通事故。因此,本研究选择心率波动和呼吸率变化 2 个指标,作为评判驾驶员自身因素中的生理特性对隧道驾驶安全舒适性的影响。

1.2.3 驾驶行为理论

驾驶员在行驶过程中应能够充分考虑他人的行动和周围状况,自觉地防止事故。在道路行驶过程中,驾驶员的驾驶行为主要包括对车辆速度的控制、对行驶路线的掌控以及对突发事件的处理。驾驶者对潜在危险点的谨慎程度决定了他们操作的频繁程度。例如,是否会频繁换道、踩刹车或油门的频率等。在模拟隧道环境内,通过观测驾驶员驾驶速度、车道中心线偏移量、超速时间占比等参数,发现行驶在隧道中的汽车如果观察到旁边有大车驶近或前方为弯道时,会下意识地远离危险侧偏离或大幅度调整方向盘等,对驾驶员行车体验影响较大,且存在安全隐患。因此,在隧道行驶过程中,驾驶行为也是影响驾驶安全舒适性的重要因素之一。本研究选择运行速度与设计车速差值、车道中心线偏移量和超速时间占比 3 个指标来反映隧道中的驾驶行为。

2 隧道行车安全舒适度评价模型

基于前文基础理论研究,本节通过选取合理指标,建立完善的评价指标体系,合理构建隧道行车安全舒适度评价模型。

2.1 评价指标体系的构建

通过对驾驶员受影响因素的分析及相关文献研究,汇总影响驾驶员安全性和舒适度的不同因素:

1) 基于人眼视觉特性,选取评估驾驶员眼动指标:瞳孔面积变化率 P ;平均注视时间 \bar{T} ;扫视平均速度 V 。

2) 基于驾驶生理特性,选取反映驾驶员生理的指标:心率波动 H ;呼吸率变化 R 。

3) 基于驾驶行为理论,选取评估驾驶员行为的指标:运行速度与隧道设计车速差值 V_{85D} ;车道中心线偏移量 L ;超速时间占比 O 。

下一节将对以上 8 项指标的定义进行说明。其中,驾驶员眼动指标与驾驶员生理指标反映驾驶舒适度,驾驶员行为指标反映驾驶安全性,以此构建隧道驾驶安全舒适度体系。指标体系如图 4 所示。

2.1.1 舒适度指标

1) 驾驶员眼动指标

① 瞳孔面积变化率 (P)

$$P = \left| \frac{S_{i2} - S_{i1}}{S_{i1}} \right| \times 100\% \quad (1)$$

式中: P 为驾驶人瞳孔面积变化率(%); S_{i1} 为前一时刻驾驶人瞳孔面积(mm^2); S_{i2} 为后一时刻驾驶人瞳

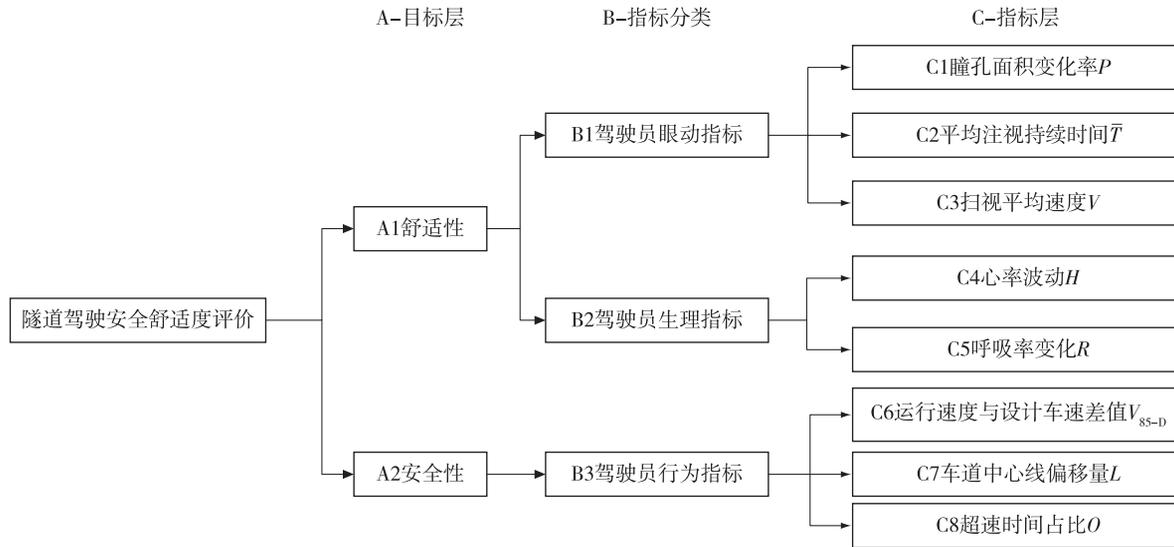


图4 安全舒适度评价体系框架

Fig. 4 Framework for driver safety and comfort evaluation in tunnel driving

孔面积(mm^2).

②平均注视持续时间(\bar{T})

$$\bar{T} = T_{\text{总}} / k. \quad (2)$$

式中: \bar{T} 为平均注视持续时间(ms); $T_{\text{总}}$ 是该实验者的驾驶总时间(ms); k 为注视次数.

③扫视平均速度(V)

$$V = A / T_{\text{扫}}. \quad (3)$$

式中: V 为每一次扫视的角度与扫视持续时间的比值($^\circ/\text{s}$); A 为扫视的角度($^\circ$); $T_{\text{扫}}$ 为扫视持续时间(s).

2) 驾驶员生理指标

①心率波动(H)

心率是指正常人安静状态下每分钟心跳的次数,单位为次/min.心率可以作为度量驾驶人工作强度的一个有效指标,成人理想心率在60~80次/min,取中间值70次/min作为参考值,记为 $H_{s,\text{std}}$.在模拟驾驶过程中,可以用心率波动对驾驶人驾驶过程中的心理紧张状态及舒适程度进行分析研究.记驾驶员行驶过程中平均心率为 H_s ,单位为次/min,则心率波动 H :

$$H = \frac{H_s - H_{s,\text{std}}}{H_{s,\text{std}}}. \quad (4)$$

②呼吸率变化(R)

不同的环境下人的呼吸次数会发生一定变化,可以利用人的呼吸次数的变化来反映人的心理状态,进而分析外部环境对人的影响程度.本研究选用

呼吸率变化作为指标,以表征隧道环境与正常环境下的呼吸频率(%).呼吸频率正常值为每分钟12~20次,取中间值16次/min作为参考值,记为 $B_{r,\text{std}}$.记驾驶员呼吸频率为 B_r ,单位为次/min,则呼吸率变化 R :

$$R = \frac{B_r - B_{r,\text{std}}}{B_{r,\text{std}}}. \quad (5)$$

本研究选用呼吸率变化作为指标,以表征隧道环境与正常环境下的呼吸频率变化,单位为%.

2.1.2 安全性指标

安全性指标主要由驾驶行为指标来表征,基于现有研究,选取运行速度与设计车速差值(V_{85-D})、车道中心线偏移量(L)、超速时间占比(O)3个指标.

1) 运行速度与设计车速差值(V_{85-D})

公路设计时,同一路段运行速度(V_{85})与设计速度(V_D)之差(V_{85-D})宜小于20 km/h^[18].为了结合运行速度和设计速度,运行速度取车速频率分布曲线中第85%车速,记作 V_{85} ;设计速度记作 V_D ,定义运行速度与设计车速差(记为速度差) $V_{85-D} = |V_{85} - V_D|$,单位为km/h.提出3个等级安全评价指标(好: $V_{85-D} \leq 10$ km/h;一般: $10 \text{ km/h} < V_{85-D} \leq 20$ km/h;差: $V_{85-D} > 20$ km/h)对驾驶员驾驶行为进行评价.

2) 车道中心线偏移量(L)

车道中心线偏移量是指机动车中心距车道中心点的距离或偏移值,既能反映驾驶员对车道的保持力,也可反映机动车在行驶过程中与沿车道中心点

行驶的吻合程度,单位为 m.部分学者^[19-21]通过调查道路隧道中的驾驶员行为后将车道中心线偏移量 L 用作评估驾驶员开车情况的重要指标.

3) 超速时间占比(O)

超速时间占比是指车辆在行驶过程中超速时间占总行驶时间的比率,单位为%.它既能反映驾驶员对速度的保持能力,也可侧面体现汽车在行驶过程中驾驶员心理变化.

2.2 隧道安全舒适度评价模型构建

1) 指标类型一致化

选取的指标中 P 、 \bar{T} 、 V_{85-D} 、 L 、 O 均为负向指标, V 为正向指标, H 和 R 为适度指标.8 个指标中负向指标占比最大,因此将所有指标调整为负向指标.

2) 无量纲化

为减少对各指数不同量纲的影响,对评价指数做无量纲化处理.所选取指标类型统一为负向指标,采用 min-max 归一化到 $[0, 1]$ 区间.

3) 确定权重

熵权法属于客观赋权方法,全程采用数值方法进行定量分析,能够最大限度地对研究对象做出客观性评判,从而有效减少个人的主观因素对结论的影响.熵权法常用于构建评价模型^[22-23],基于驾驶模拟实验获得的大量数据易于熵权法的使用.使用熵权法计算不同指标的平均值和方差,得到不同指标的离散程度,从而求出各指标的权重值.

4) 模型表示

隧道驾驶安全舒适度指标 SC 的数学模型如下:

$$SC = \sum_{n=1}^8 (q_n \cdot A_n). \quad (6)$$

式中: SC 表示隧道驾驶安全舒适度,范围为 $[0, 1]$, 属最小值评价,即数值越小,评估绩效越优; q_n 为不同指标对应的权重; A_n 表示 8 项指标处理数值; $n = 1, 2, \dots, 8$, 分别对应 P 、 \bar{T} 、 V 、 V_{85-D} 、 L 、 O 、 H 、 R .

3 隧道驾驶室内仿真研究

3.1 隧道照明系统建模

本研究采用 UC-win/Road 作为隧道照明系统建模以及隧道行车仿真的平台. UC-win/Road 是一款基于模块化和图形化的建模仿真软件,其强大的三维建模功能和场景渲染能力能够真实地模拟驾驶员在实际隧道内的驾车辆情况.通过外接驾驶模拟器的方式进行驾驶模拟行车仿真,动态仿真隧道内驾驶员行车过程,实时反映隧道驾驶过程中驾驶员的操作对行车

的影响.隧道照明系统建模流程如图 5 所示.

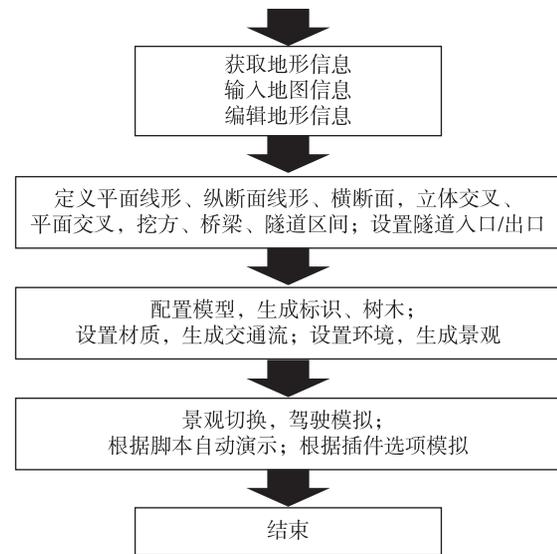


图 5 隧道照明系统建模流程

Fig. 5 Tunnel lighting system modeling process

3.2 基于驾驶模拟的隧道行车仿真

3.2.1 隧道模型参数设置

仿真模型的变量控制通过改变模型内相关参数实现.本研究的目标是评估不同隧道照明光环境下驾驶员的行车状态,深入分析照明亮度、照明色温对驾驶员驾驶行为的影响,因此以隧道照明中的照明亮度、照明色温作为变量,通过 2 种变量不同数值之间的组合构建实验组,开展隧道行车仿真实验.

3.2.2 隧道行车仿真环境

本研究通过硬软件结合应用的方式实现“虚拟环境构建—驾驶模拟—驾驶员行为状态监测”3 个核心内容,所用硬软件名称及作用如表 1 所示.

表 1 仿真实验所用仪器、作用及相关测量指标

Table 1 Instruments, functions and related measurement indexes used in simulation experiment

实验仪器/软件名称	作用	被测指标
UC-win/Road 软件	构建隧道仿真模型	V_{85-D} 、 L 、 O
Logitech G923 驾驶模拟器	真实模拟车辆驾驶	
Dikablis Glasses 3 眼动记录仪	采集驾驶员眼动数据	P 、 \bar{T} 、 V
Physiol.LAB 无线生理仪	记录人体生理相关数据	H 、 R

4 案例研究

4.1 隧道照明实地调研及模型构建

本研究选取深圳市塘朗山隧道为案例研究对象.塘朗山隧道是深圳市最长的隧道之一,线路全长

1 711 m, 隧道内共 3 条车道, 限速 50 km/h, 隧道内车辆按相应车型分道行驶, 禁止随意变道. 构建的仿真模型中, 选用的变量(照明亮度、照明色温)会根据需求进行设置, 其他条件设置均趋近于实际情况.

为使照明系统模型各照明区段亮度取值区间与实际隧道照明情况相近, 本研究对案例隧道亮度采用 TES-137 亮度计进行实地测量, 并记录光照亮度. 依据现场调研情况及参考公路隧道照明设计相关技术标准, 对建立的隧道模型进行区段划分, 对各照明区段进行灯具布设. 隧道各照明区长度划分结果如表 2 所示.

建成的隧道照明系统模型效果与实际隧道对比如图 6 所示.

表 2 塘朗山隧道各照明区段长度

Table 2 Length of each lighting section of Tanglang Mountain tunnel

	入口段		过渡段			中间段	出口段	
	TH1	TH2	TR1	TR2	TR3	IN	EX1	EX2
长度/m	22.5	22.5	48	67	100	1 390	30	30

4.2 隧道驾驶模拟室内仿真实验

1) 实验组设置

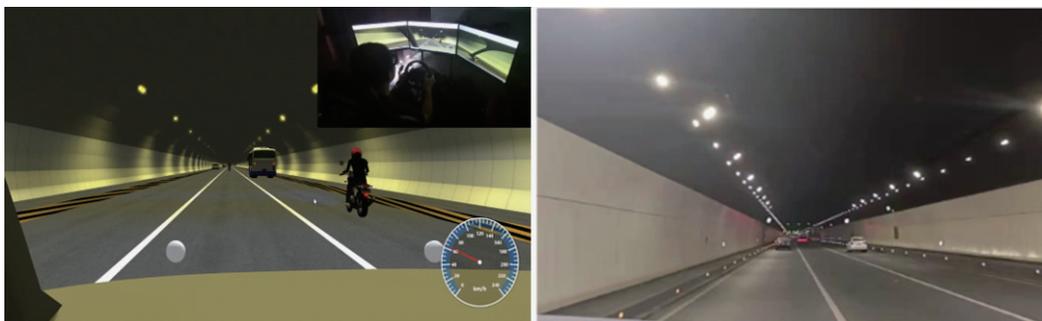
综合考虑国内公路隧道照明相关细则标准, 并结

合实地调查的隧道洞外及洞内亮度值, 确定的 5 组中间段照明亮度值依次为: 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 cd/m^2 . 由于隧道常用 2 500~5 500 K 的照明色温, 在颜色上体现为白光、黄光与橙光, 故本实验选用这 3 类色温的光源以探究不同色温条件对驾驶员行驶的影响, 共计设置 $5 \times 3 = 15$ 组实验, 实验组别设置如表 3 所示.

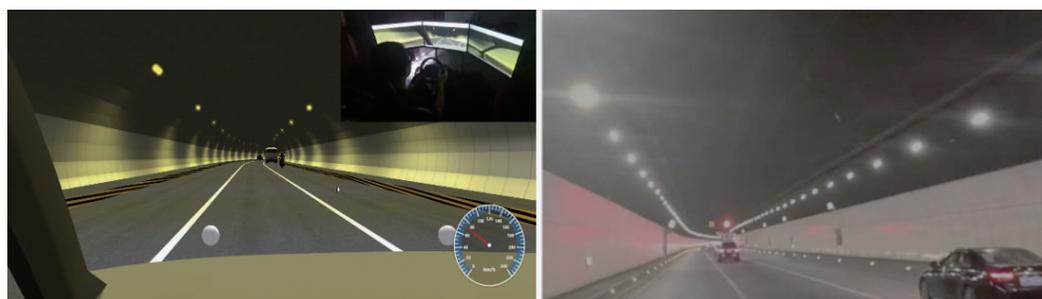
表 3 仿真实验组设置

Table 3 Simulation experimental group setting

实验组序号	照明色	照明亮度/ (cd/m^2)
1	白光	1.0
2		1.5
3		2.0
4		2.5
5		3.0
6	黄光	1.0
7		1.5
8		2.0
9		2.5
10		3.0
11	橙光	1.0
12		1.5
13		2.0
14		2.5
15		3.0



a. 隧道直线路段



b. 隧道转弯路段

图 6 模型效果与实际隧道对比(左模型, 右实际; 左图右上角为实验过程实拍)

Fig. 6 Comparison between modeled tunnel and actual tunnel

2) 实验流程

实验流程如图7所示。

实验开始前需要拉上窗帘遮光,关闭实验室灯光,采集数据的屏幕也尽量远离实验区域,避免外界其他光照对实验的影响。每位受试者实验开始前需要穿戴生理仪及眼动仪并校准仪器,确保设备准确运行。

每位实验人员需做15组实验,采集他们在不同照明工况下隧道行车的眼动数据、生理数据及驾驶行为数据。每组实验重复进行5次取平均值以保证数据的准确性,得到不同亮度及不同色温对驾驶员行车舒适度的影响。隧道行车仿真实验现场如图8所示。

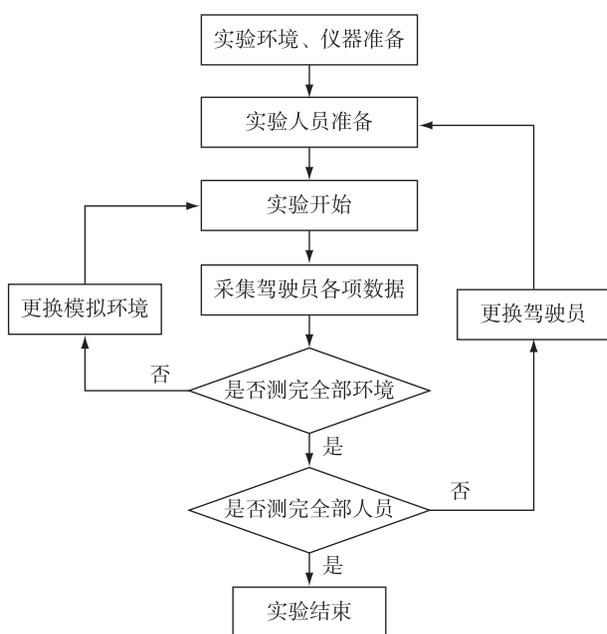


图7 实验流程

Fig. 7 Experimental flow chart

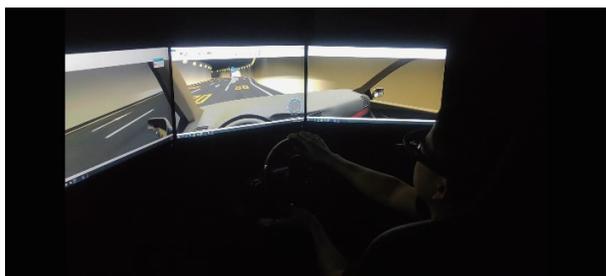


图8 隧道行车仿真情况

Fig. 8 Tunnel driving simulation

3) 实验人员

参考现有相关文献选取的实验人数规模^[24],本

实验共选取10名实验人员(男驾驶员7名、女驾驶员3名),年龄均在26~50岁之间。所有实验人员矫正后双眼视力至少达5.0,均持有中国C1驾照,驾驶经验均超过3年。在选定符合要求驾驶员后,对所有驾驶员进行驾驶模拟操作规程的培训,保证所有实验人员熟知驾驶模拟器的操作规范和流程。考虑到同一驾驶员重复行驶相同隧道会存在短时记忆效应,因此,每位驾驶员进行一次实验的间隔为7d,实验时间跨度大。

4.3 实验结果

4.3.1 亮度变化影响下各指标监测结果

选取1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 cd/m²共计5种亮度值进行亮度影响研究,结果如图9所示,图9中虚线表示均值。

在确定的色温条件下,8项指标均为负向指标(数值越小越优),因此只对各项指标最小值进行说明。由图9可知:瞳孔面积变化率在亮度为2和2.5 cd/m²时最小,为1.75%,低于平均值9.79%;平均注视持续时间在亮度2.5 cd/m²时最小,为423.31ms,低于平均值14.73%;扫视平均速度在亮度为2 cd/m²时最小,为12.69(°)/s,低于平均值9.55%;速度差在亮度为2.5 cd/m²时最小,为14.08 km/h,低于平均值12.82%;车道中心线偏移量在亮度为2.5 cd/m²时最小,为0.39 m,低于平均值17.02%;超速时间占比在亮度为2 cd/m²时最小,为10.84%,低于平均值16.81%;心率波动在亮度为2.5 cd/m²时最小,为3.12%,低于平均值14.57%;呼吸率变化在亮度为2.5 cd/m²时最小,为2.85%,低于平均值18.75%。

4.3.2 色温变化影响下各指标监测结果

对实验数据进行处理后得到每位驾驶员在3种色温环境下的各指标数据,具体数值如图10所示。

由图10可见:在确定的亮度条件下,白光环境中,瞳孔面积变化率、平均注视持续时间、扫视平均速度、超速时间占比、心率波动、呼吸率变化共计6项指标达到最低,分别为1.59%、462.03ms、19.89(°)/s、14.14%、4.25%、3.62%;黄光环境中,速度差指标达到最低,为9.38 km/h;橙光环境中,车道中心线偏移量指标达到最低,为0.43 m。

5 隧道驾驶安全舒适度分析

5.1 数据定性分析及受试者采访

在改变隧道照明亮度时,实验中各类指标变化

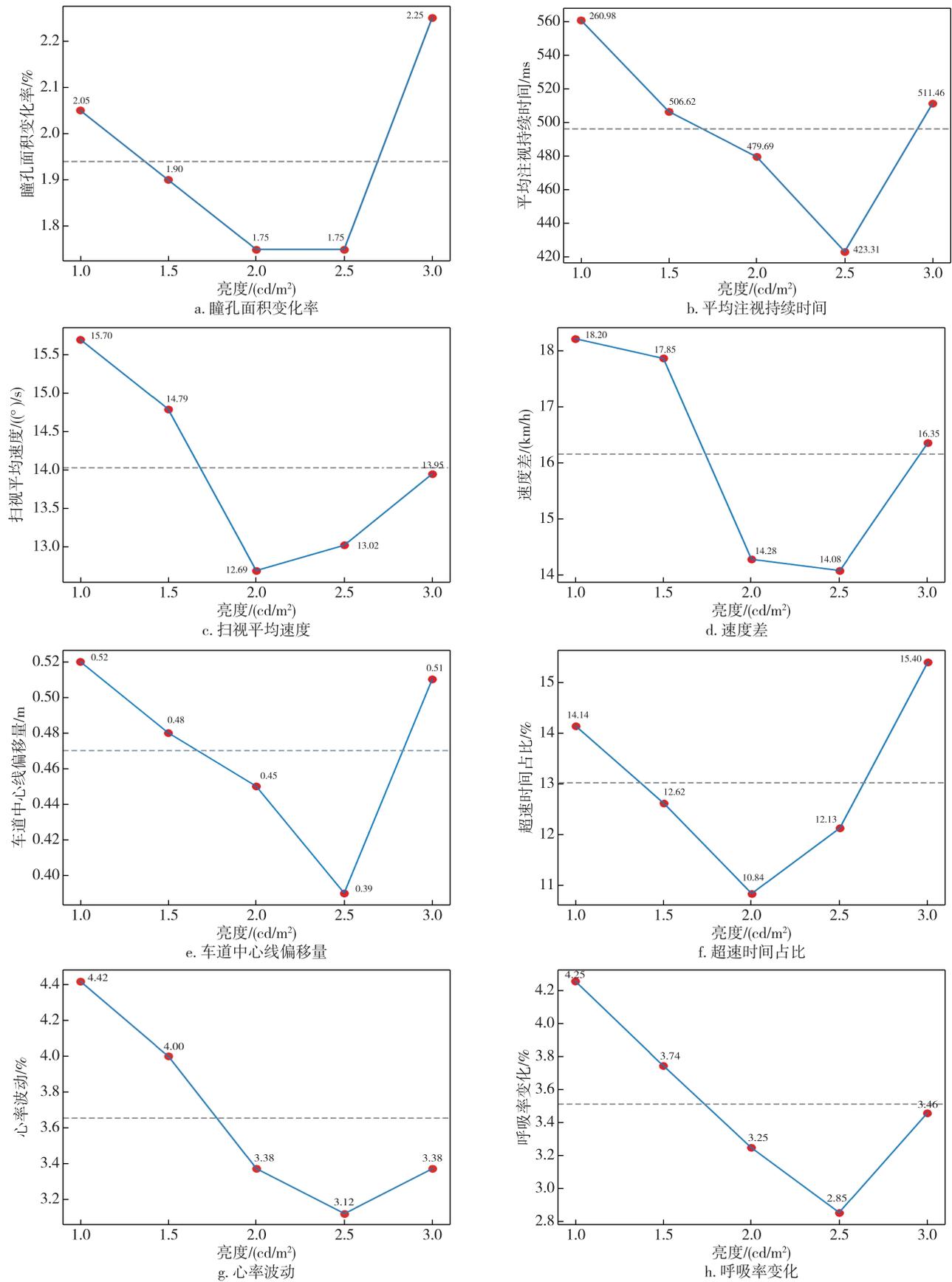


图9 不同亮度环境下各指标变化情况

Fig. 9 Line chart of driver indicators under different brightness

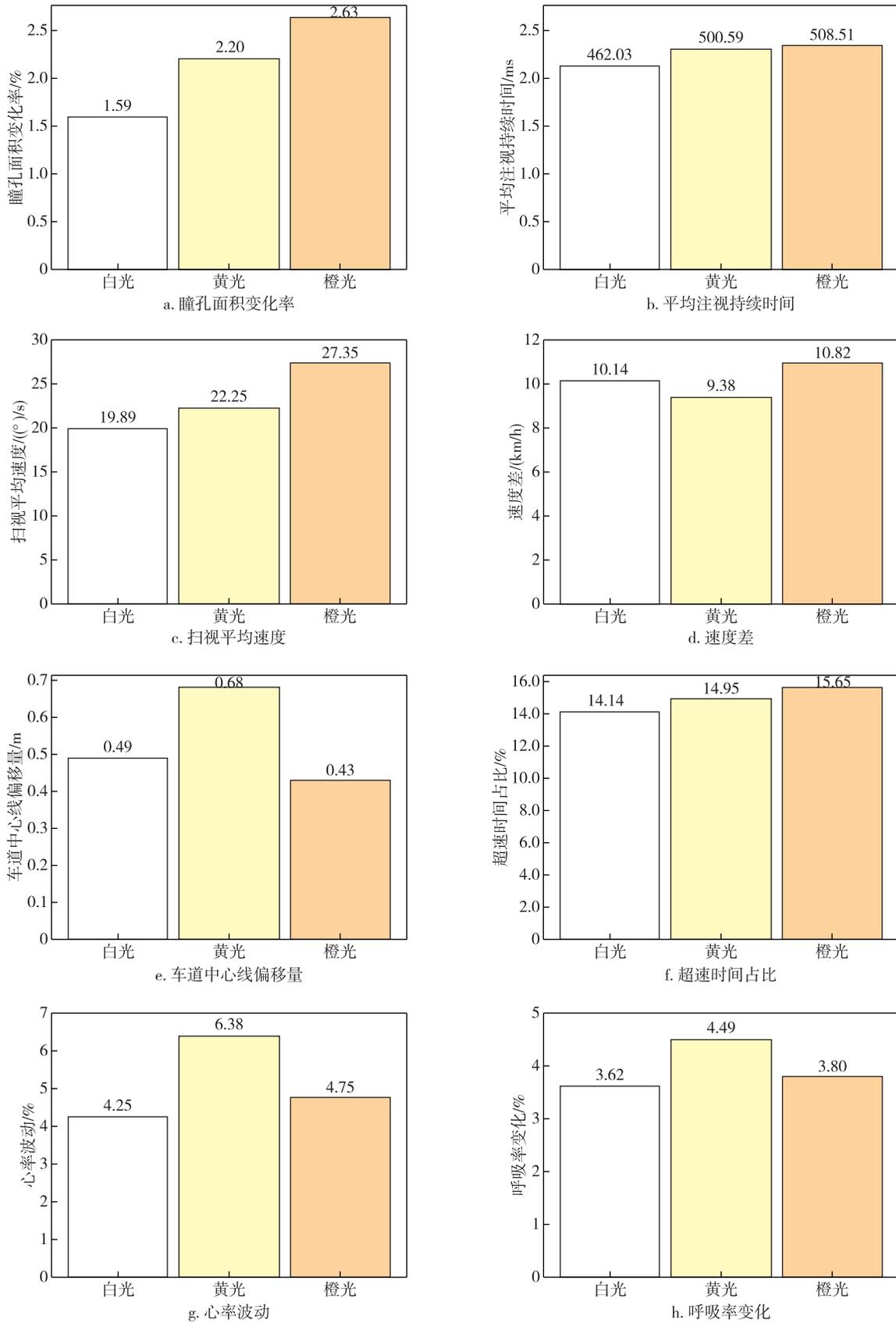


图 10 不同色温环境下驾驶员各指标柱状图

Fig. 10 Bar chart of driver indicators under different color temperatures

趋势较为一致:随着亮度增加,驾驶员各项指标数值起初呈减小趋势,即行车安全及舒适度提升,而当亮度增加至一定阈值后各指标数值会开始回升,行车安全及舒适度有所下降.在改变隧道照明色温时,照明色温对瞳孔面积变化率、扫视平均速度、车道中心线偏移量、心率波动、呼吸率变化的影响较显著.

对 10 名受试者进行试后采访,其中较为一致的意见是:1)亮度方面,隧道内整体环境昏暗时,行驶过程中需要消耗更多的精力解读周边的环境以保证行车安全;当亮度不断增加,驾驶感受会逐渐舒适,驾驶表现有所提升,而当环境亮度超过一定阈值后,驾驶员的感官会产生疲惫感导致反应力降低,从而导致驾驶表现下降.2)色温方面,橙光环境下色温很低,使得隧道变得更为压抑,因此驾驶行为变得格外谨慎,对周围环境感知能力下降,观察周边环境所用时间显著增加.上述意见与实验过程中观测到生理仪器显示驾驶过程中有些驾驶员出现了有车经过或者转弯时屏住呼吸或者心跳加速的情况相符.

由此可见,本实验数据结果定性分析与现实驾驶感受一致程度较高,一定程度上印证了本文模拟驾驶实验的可行性和科学性.

5.2 隧道驾驶安全舒适度评价计算与分析

通过对前文选取的 8 项指标进行一致化和无量纲化处理,并结合熵权法得到的对应权重构建安全舒适度评价体系,并以此得出 3 种照明色温(白光、黄光、橙光)下 5 种照明亮度对应的安全舒适度评价价值,拟合驾驶安全性与舒适度与亮度间函数关系.

基于熵权法的各指标权重值如表 4 所示.

表 4 指标权重

Table 4 Indicator weight

指标	权重	指标	权重
瞳孔面积变化率 P	0.123	车道中心线偏移量 L	0.105
平均注视持续时间 \bar{T}	0.059	超车时间占比 O	0.129
扫视平均速度 V	0.172	心率波动 H	0.116
速度差 V_{85-D}	0.139	呼吸率变化 R	0.157

由式(6)得到不同色温不同亮度的安全舒适度评价价值,3 种色温下驾驶员安全舒适度评价价值与亮度之间的关系趋势如图 11 所示.

通过 Matlab 拟合得到各类色温环境下安全舒适度评价值的计算模型:

$$y_{白} = 0.3126x^2 - 1.3423x + 1.5861, \quad (7)$$

$$y_{黄} = 0.6435x^{-0.363}, \quad (8)$$

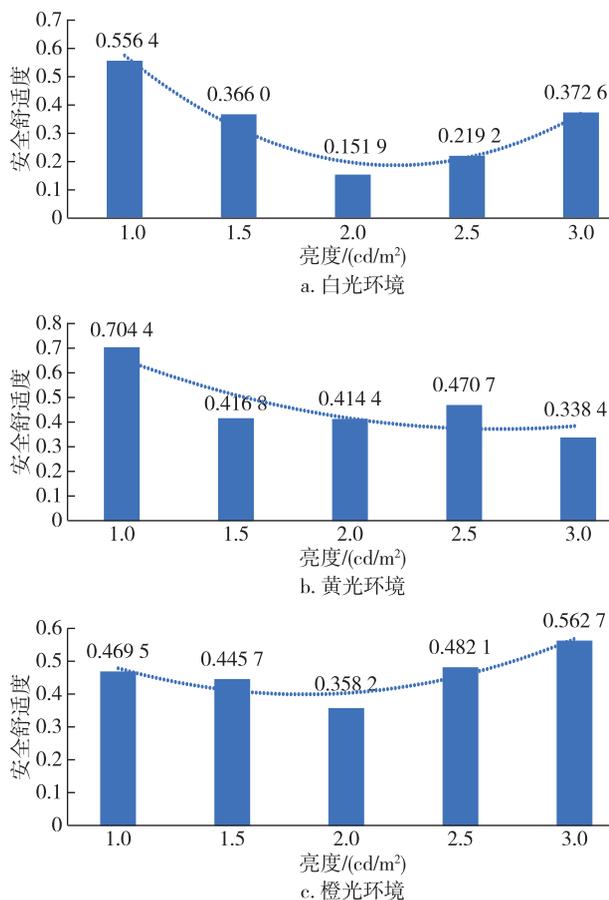


图 11 各种色温环境下驾驶员安全舒适度评价价值

Fig. 11 Evaluation results of driver safety and comfort under different color temperatures

$$y_{橙} = 0.03x^2 - 0.1587x + 0.607. \quad (9)$$

式中: x 为亮度值,单位 cd/m^2 ; y 表示安全舒适度评价价值.

由式(8)可知,黄光的安全舒适度评价价值随亮度的增加而降低(评价价值越低,安全舒适度效果越好),即黄光最优亮度取实验组亮度上界 $3 cd/m^2$,对应安全舒适度评价价值 0.432.白光和橙光色温环境下驾驶员安全性与舒适度与光照亮度间的关系更符合二次函数变化.对式(7)和式(9)求导运算,得最优亮度值及安全舒适度评价价值:

$$白光 = \begin{cases} x = 2.147, \\ y = 0.145, \end{cases}$$

$$橙光 = \begin{cases} x = 2.645, \\ y = 0.397. \end{cases}$$

白光最优亮度为 $2.147 cd/m^2$,橙光最优亮度为 $2.645 cd/m^2$,对应安全舒适度评价价值分别为 0.145 和 0.397.比较 3 种色温的最优亮度及对应的最优安全舒适度,可以发现白光环境下亮度最低,且安全舒

适度评价价值最优(负向指标,数值越低越优)。因此,实验环境中白光最优亮度取得最优的隧道行车安全舒适度,而较低的亮度在节能减排方面也具有积极作用。

6 结语

基于隧道照明理论,将隧道照明亮度、照明色温作为隧道照明系统模型变量,建立城市隧道驾驶仿真模型作为室内仿真实验环境;基于驾驶员行车理论中驾驶员的驾驶行为、视觉特性以及生理特性,筛选驾驶员 8 项指标用于评价驾驶安全舒适性,并构建评价指标体系及模型。通过在隧道照明仿真环境中开展驾驶模拟实验,全面系统地研究隧道中间段照明对驾驶员隧道行车的影响,得出以下结论:

1) 在确定的照明色温条件下,本研究选取的 8 项指标在实验环境 $1.0 \sim 3.0 \text{ cd/m}^2$ 亮度下,随亮度增加均呈现先减小再增大的趋势,表明当前条件下在 $1.0 \sim 3.0 \text{ cd/m}^2$ 之间存在一个使驾驶员隧道行车过程中既安全又舒适的亮度。

2) 在确定的照明亮度条件下,本研究选取的 8 项指标中有 6 项指标在白光环境下数值最小,基于熵权法得到的权重可得该 6 项指标合计权重为 0.756,可初步认为白光环境对实验环境中的隧道驾驶更友好。

3) 通过拟合得到 3 种照明色温下的安全舒适度评价价值-亮度数学模型,得出实验环境下最优评价价值对应的照明色温及亮度:当照明色温为白光,亮度为 2.147 cd/m^2 时,驾驶员的安全舒适评价价值最优,为 0.145。

4) 比较 3 种色温条件各自最优评价价值下的亮度,白光亮度最低,因此选用白光作为隧道照明色温,兼有节能减排作用。

在实际设置城市隧道照明系统时,为改善驾驶员的行车安全与舒适度,且出于节能考虑,在灯具的选择上应尽量选用色温较高、体现为白光色温的灯具,这与已有的相关研究结论相符^[25-26]。考虑到本研究的照明亮度设置仅适用于实验环境的中间段,且中间段亮度的安全评价价值应同时受过渡段亮度影响,因此建议隧道照明亮度设置应结合实际,在有条件的情况下开展与本研究近似的实验以确定最优亮度值。本文实验结果能够为隧道照明系统对驾驶员安全舒适度影响评估提供参考,提出的研究方案可为以驾驶员安全舒适为目标的智能化隧道照明系统

设计提供实验范例,并兼有计算机模拟仿真改造成成本低、方案移植性强的优点。

本研究中平面屏幕呈现的驾驶仿真环境与现实情景仍存在差距,未来将考虑仿真效果更优的呈现环境,如虚拟现实环境,进一步提升结果准确性。

参考文献

References

- [1] 交通运输部. 2022 年交通运输行业发展统计公报 [EB/OL]. [2023-07-03]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202306/t20230615_3847023.html
- [2] 交通运输部. 2021 年交通运输行业发展统计公报 [EB/OL]. [2023-07-03]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202205/t20220524_3656659.html
- [3] 交通运输部. 公路隧道照明设计细则: JTG/T D70/2-01—2014 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2014
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Guidance for design of lighting of highway tunnels: JTG/T D70/2-01—2014 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2014
- [4] Adrian W. Method of calculating the required luminances in tunnel entrances [J]. *Lighting Research & Technology*, 1976, 8(2): 103-106
- [5] Zhang Y Q, Zhuo X, Guo W, et al. Lighting environment optimization of highway tunnel entrance based on simulation research [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(12): 2195
- [6] 杜峰, 翁季, 张青文, 等. 公路隧道入口段昼间照明安全可见阈值分析 [J]. *灯与照明*, 2017, 41(3): 18-21
DU Feng, WENG Ji, ZHANG Qingwen, et al. Analysis to visible safety threshold of road tunnel threshold zone daytime lighting [J]. *Light & Lighting*, 2017, 41(3): 18-21
- [7] 贺占跃, 吕晓峰, 李宏杰. 公路隧道照明调光与行车安全分析 [J]. *工程建设与设计*, 2020(17): 58-60
HE Zhanyue, LYU Xiaofeng, LI Hongjie. Analysis of highway tunnel lighting dimming and driving safety [J]. *Construction & Design for Engineering*, 2020(17): 58-60
- [8] Liao H Y, Chen S Y, Le H T, et al. Design and prototyping of efficient LED counter beam light with free-formed surface for meeting international tunnel lighting standards [J]. *Energies*, 2021, 14(2): 488
- [9] Luo Q A, Chen X Q, Yuan J E, et al. Study and simulation analysis of vehicle rear-end collision model considering driver types [J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2020, 2020: 1-11
- [10] Wang C, Zhao X, Fu R, et al. Research on the comfort of vehicle passengers considering the vehicle motion state and passenger physiological characteristics: improving the passenger comfort of autonomous vehicles [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(18): 6821
- [11] 宋建忠. 影响驾驶员行车安全的心理因素及应对策略

- [J].时代汽车, 2021(19): 187-188
SONG Jianzhong. Psychological factors affecting drivers' driving safety and coping strategies [J]. Auto Time, 2021(19): 187-188
- [12] 罗杰,程鹏,陆百川,等.基于驾驶员心率变异性的光学隧道驾驶负荷分析[J].重庆理工大学学报(自然科学), 2019, 33(8): 44-50, 64
LUO Jie, CHENG Peng, LU Baichuan, et al. Analysis of driver workload on optical tunnel based on driver HRV [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2019, 33(8): 44-50, 64
- [13] 何世永,梁波,钟升明,等.基于光环境室内仿真和视觉功效实验的公路隧道照明评价方法研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(3): 27-35
HE Shiyong, LIANG Bo, ZHONG Shengming, et al. Evaluation method of highway tunnel lighting based on indoor simulation of light environment and visual performance experiment [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2020, 39(3): 27-35
- [14] 梁波,何世永,潘国兵,等.基于新型内装材料的公路隧道行车安全研究[J].现代隧道技术, 2015, 52(2): 16-21, 29
LIANG Bo, HE Shiyong, PAN Guobing, et al. Study of driving safety in a highway tunnel with new interior applied materials [J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(2): 16-21, 29
- [15] 冯志慧.基于驾驶员认知特征和视觉特性的高速公路景观设计方法研究[D].西安:长安大学, 2012
FENG Zhihui. Study on freeway landscape design method based on drivers' cognitive and visual characteristics [D]. Xi'an: Changan University, 2012
- [16] 陶盼盼.基于驾驶员视觉特性的隧道反光环设置研究[D].重庆:重庆交通大学, 2016
TAO Panpan. Research on tunnel's aura setting based on the driver's visual characteristics [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016
- [17] 胡月琦,刘浩学,朱彤,等.高速公路特长隧道环境中驾驶员视觉特性研究[J].中国安全科学学报, 2017, 27(6): 31-36
HU Yueqi, LIU Haoxue, ZHU Tong, et al. Research on visual characteristics of drivers driving through extremely long expressway tunnel [J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(6): 31-36
- [18] 交通运输部.公路工程技术标准: JTG B01—2014 [S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2015
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical standard of highway engineering: JTG B01—2014 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015
- [19] 赵海青.基于驾驶员认知的车辆安全综合评价研究[D].北京:北京林业大学, 2006
ZHAO Haiqing. Study on comprehensive evaluation of drivers' perception of vehicle safety [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006
- [20] 高哈.模拟驾驶条件下驾驶员生理特性实验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2008
GAO Han. Experimental study on the driver's physiological characteristics under simulated driving conditions [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008
- [21] Doulos L T, Sioutis I, Tsangrassoulis A, et al. Revision of threshold luminance levels in tunnels aiming to minimize energy consumption at no cost: methodology and case studies [J]. Energies, 2020, 13(7): 1707
- [22] 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, 2022
GAO Xin. Traffic safety analysis and countermeasures of urban road tunnel based on running speed [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022
- [23] 刘壮.基于熵权 TOPSIS 的高速公路隧道运营安全性评价[J].公路交通技术, 2017, 33(1): 107-110, 119
LIU Zhuang. Safety evaluation of expressway tunnel operation based on entropy TOPSIS [J]. Technology of Highway and Transport, 2017, 33(1): 107-110, 119
- [24] 梁波,张红杰,牛佳安,等.基于扫视变化特性的城市隧道驾驶紧张情绪分析[J].安全与环境学报, 2023, 23(10): 3623-3631
LIANG Bo, ZHANG Hongjie, NIU Jiaan, et al. Analysis of driving nervousness in urban tunnel based on saccade change characteristics [J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(10): 3623-3631
- [25] 秦歌.LED 色温和能见度对隧道中间段照明影响的研究[D].大连:大连海事大学, 2020
QIN Ge. Impact of LED color temperatures and visibility on lighting in tunnel interior zone [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2020
- [26] 冯森.隧道中间段 LED 照明中色温对主观舒适度的影响[D].大连:大连海事大学, 2021
FENG Sen. The impact of color temperature on visual comfort under LED lighting in tunnel interior zone [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2021

Evaluating tunnel lighting impact on driver safety and comfort via driving simulation

HU Mingwei^{1,2,3,4} WU Wenlin² TIAN Qingyan^{5,6} GUO Zhongxin² YANG Wenjie²

1 State Key Laboratory of Intelligent Geotechnics and Tunnelling, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

2 College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

- 3 Key Laboratory of Coastal Urban Resilient Infrastructures (Shenzhen University), Ministry of Education, Shenzhen 518060, China
- 4 Underground Polis Academy, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China
- 5 Guangdong Provincial Key Laboratory of Tunnel Safety and Emergency Support Technology & Equipment, Guangzhou 510550, China
- 6 Guangdong Hualu Transport Technology Co., Ltd., Guangzhou 510420, China

Abstract The development mode of transportation infrastructure construction has shifted from pursuing speed and scale to prioritizing quality and efficiency. As a result, there has been an increasing demand for fine-tuning and adapting the tunnel lighting environment, which should prioritize the safety and comfort of drivers. Based on tunnel lighting theory and driving behavior researches, eight indicators that affect driver safety and comfort were selected to establish a driving safety and comfort evaluation system. Indoor simulation was conducted through tunnel driving simulation environment and hardware facilities. A virtual simulation model of the tunnel was established using UC-win/Road software, and data corresponding to the eight indicators were obtained through driving simulators and physiological instruments. Then the entropy method was used to determine the weights of the indicators, and the driving safety and comfort in the tunnel under different lighting brightness and color temperature environments were evaluated. The target value of brightness and color temperature in the tunnel were obtained with the goal of achieving the optimal value of driver safety and comfort. The experimental results confirm the effectiveness of the driver safety and comfort evaluation system, propose an improved tunnel lighting scheme, and provide reference for tunnel operators.

Key words tunnel lighting; driving simulation; virtual simulation; driving safety; comfort; evaluation model