

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.04.004



考虑驾驶员视觉适应的公路隧道入口段 亮度确定方法

胡英奎^{a,b}, 陈仲林^b, 张青文^b, 翁季^b, 黄珂^b, 林勇^b

(重庆大学 a. 土木工程学院; b. 建筑城规学院, 重庆 400045)

摘要: 驾驶员的视觉适应过程直接影响交通安全。为考虑驾驶员的视觉适应过程, 在确定公路隧道入口段亮度时, 通过实测得到驾驶员驾车进入隧道过程中的瞳孔大小变化数据, 建立了描述驾驶员驾车进入隧道过程中瞳孔面积变化速率最大值与各相关参数之间关系的数学模型。以驾驶员不发生视觉障碍的瞳孔面积变化临界速率为基准, 计算得到了驾驶员瞳孔面积变化达到临界速率时, 隧道入口段的最低亮度, 分析了隧道入口段所需最低亮度与洞外亮度之间的关系, 通过回归分析建立了隧道入口段亮度与洞外亮度之间关系的数学模型, 得到了考虑驾驶员视觉适应的公路隧道入口段亮度确定方法。

关键词: 隧道照明; 入口段亮度; 适应亮度; 视觉适应; 瞳孔大小

中图分类号: TU113.6; U453.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2016)04-0020-07

Tunnel threshold zone luminance determined method based on drivers' visual adaptation

Hu Yingkui^{a,b}, Chen Zhonglin^b, Zhang Qingwen^b, Weng Ji^b, Huang Ke^b, Lin Yong^b

(a. School of Civil Engineering; b. Faculty of Architecture and Urban Planning,

Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Drivers' visual adaptation influenced traffic safety. In order to consider drivers' visual adaptation directly when determine road tunnel threshold zone luminance, drivers' pupil size data were measured when they driving into tunnels, and established a mathematical model to describe the relationship between the max speeds of drivers' pupil area changes and related parameters. The maximum speed of drivers' pupil size changes, which could ensure drivers' visual function, were confirmed as critical speeds. The minimum tunnel threshold zone luminance was calculated based on the critical speeds, the relationship between the minimum tunnel threshold zone luminance and corresponding access zone luminance were analyzed, a mathematical model was established to describe the relationship between tunnel threshold zone luminance and access zone luminance with regression method, tunnel threshold zone luminance determined method was proposed based on drivers' visual adaptation.

Keywords: tunnel lighting; threshold zone luminance; adaptation luminance; visual adaptation; pupil size

收稿日期: 2016-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(51278507, 50908240)

作者简介: 胡英奎(1978-), 男, 博士, 主要从事交通照明研究, (E-mail)hyk@cqu.edu.cn.

Received: 2016-03-15

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51278507, 50908240)

Author brief: Hu Yingkui (1978-), PhD, main research interest: tunnel and road lighting, (E-mail)hyk@cqu.edu.cn.

由于驾驶员的适应亮度变化剧烈,公路隧道入口段附近是交通事故多发路段。采用科学的隧道入口段亮度确定方法,有利于合理确定隧道入口段的照明水平,进而在确保交通安全的前提下实现照明节能。

对于隧道入口段亮度的确定方法,国际照明委员会(CIE)在 CIE 88—1990^[1] 中推荐采用 k 值法,在 CIE 88:2004^[2] 提出采用察觉对比法;日本机动车隧道照明标准(JIS Z 9116—1990)^[3] 中提出入口段亮度由接近段亮度和考虑设计速度的折减系数确定;欧盟隧道照明标准(CR 14380:2003 E)^[4] 中列出了 L_{20} 法、考虑交通状况的 L_{20} 法、光幕亮度法、空间和适应方法等 4 种确定隧道入口段亮度的方法;英国隧道照明设计规范(BS 5489—2:2003+A1:2008)^[5] 采用了 CR 14380:2003 E^[4] 中的考虑交通状况的 L_{20} 法;挪威^[6] 以洞外适应亮度为基础,考虑交通流量和行车速度确定隧道入口段亮度。中国《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ 026.1—1999)^[7] 采用 k 值法确定隧道入口段亮度,《公路隧道照明设计细则》^[8] 也继续采用该方法。杜志刚等^[9] 通过行车实验得到了隧道内距离进口 x 处的亮度值;胡松洁^[10] 提出了短隧道环境下入口段照明设置水平;殷颖^[11-12] 对比分析了 k 值法、SRN 主观评价法和察觉对比法等 3 种隧道入口段亮度的方法;胡英奎等^[13] 对比分析了 k 值法和最小察觉对比法。从已有研究成果可以看出,虽然已对隧道入口段亮度确定方法开展了大量研究,但研究内容主要集中在 k 值法和察觉对比法上。从驾驶员的视觉特点和需求出发研究隧道入口段亮度,确保驾驶员在驾车进入隧道过程中不因光环境的剧烈变化发生视觉障碍,从而确保行车安全,是最直接的隧道入口段亮度确定的方法,而该方法还鲜有研究人员涉及。

笔者在前期研究驾驶员驾车接近隧道过程中适应亮度^[14] 和瞳孔大小^[15] 变化规律的基础上,根据实测得到的驾驶员驾车进入隧道过程中的瞳孔大小变化数据,提出了考虑驾驶员视觉适应的公路隧道入口段亮度确定方法。

1 光环境参数及驾驶员瞳孔大小测试

为了获得驾驶员驾车进入隧道过程中的瞳孔变化数据,2010年8月18日至20日,在福建省境内永武(永安—武平)高速公路上的龙井隧道、黄山岭隧道、石背角隧道和溪背山隧道对驾驶员驾车进入隧道

过程的瞳孔变化及相应的光环境参数进行了测试。

1.1 测试的基本情况

1.1.1 测试对象 所测的 4 座隧道位于福建省境内永武高速公路上,测试时间 8 月份是当地日照最强的季节,测试的 3 天均为晴天多云天气。为了获得不同的洞外亮度,每天的测试分早晨(7:00—9:00)、中午(11:00—13:00)和傍晚(16:00—18:00) 3 个时段进行;为了获得不同的入口段亮度,测试过程中开启隧道入口段照明系统的不同回路。测试时,驾驶员头戴眼动仪头盔,尽量以隧道的设计速度(80 km/h)驾车进入隧道,用眼动仪记录驾驶员的瞳孔大小。用亮度计测量隧道洞外亮度和隧道入口段路面亮度。

1.1.2 测试车辆 考虑所用车辆的代表性和测试的方便性,测试选用永武高速公路路政管理部门的工作用车,即由东南三菱生产的三菱君阁(ZINGER)MPV 商务车。测试用车车况良好,前挡风玻璃及前排车窗清洁无污染。

1.1.3 被测人员 考虑驾驶员的代表性及驾驶员对测试用车的车况和操作较熟悉的要求,选择了 8 名男性驾驶员作为被测人员,被测人员全部为永武高速公路的路政管理人员。被测人员的年龄在 28~40 岁,平均年龄 33.4 岁,所有被测人员均无色盲、色弱情况,校正视力均在 5.0 以上,为了眼动仪测试的方便,所有驾驶员都不佩戴眼镜(隐形眼镜除外)。

1.1.4 主要测试仪器和设备 用 iView X HED 眼动仪记录被测人员的瞳孔大小。眼动仪场景摄像机的采样频率为 25 Hz,即每 40 ms 左右采集一帧图像,眼睛摄像机的采用频率为 50 Hz,即每 20 ms 左右对眼睛采集一次数据。用 LM-3 瞄点式亮度计测量路面亮度和洞外景物亮度。用 Canon EOS 50D 数码相机对隧道洞口拍照,以记录隧道外驾驶员视野中的景物组成,与 Canon EOS 50D 数码相机搭配使用的镜头为 Canon EF 17—40 mm f/4L USM。

1.2 测试方法和步骤

1.2.1 亮度测量 亮度测量包括隧道入口段亮度测量和洞外景物亮度测量。

1)隧道入口段亮度测量。路面测点参考 CIE 88—1990^[1] 布置,测量点布置为 3 行 3 列,各测点处的路面亮度用 LM-3 瞄点式亮度计测量。在各隧道入口段布置测点后,将亮度计安放在距路面第一行测点 100 m 处的车道中央,测量时使用亮度计的最

小视场角 0.03° 。

2) 洞外景物亮度的测量。实测涉及到的隧道洞外景物主要包括路面、植被、天空、洞口、裸露的岩石、护壁等。洞外景物亮度测量采用 LM-3 瞄点式亮度计的最大视场角, 即 2° , 且取至少 3 个不同位置的同种景物亮度的平均值作为该景物亮度的测量值。测量洞外亮度时, 亮度计放置在距洞口一个安全停车距离处的行车道中心线上。由于天然光环境变化较快, 隧道洞外景物亮度变化也较快。为了方便测量, 对于一个隧道的一个测试时段仅测量一次洞外景物亮度, 该时段的洞外亮度都以该次测量得到的洞外景物亮度为基础计算得到。

1.2.2 洞外景物拍照 对洞外景物拍照时, 数码相机位于路面中心, 相机镜头距路面的高度为 1.5 m, 相机镜头对准隧道的中心位置, 使用镜头的广角端对隧道洞口及其周围景物拍照。

1.2.3 瞳孔大小测量 驾驶员瞳孔大小的测量采用 SMI iViewX HED 眼动仪。测试开始前, 让驾驶员将测试车正对隧道停在距隧道一段距离(一般距隧道口 300 m 以上)处。测试开始, 车辆启动后应尽快将车速提高到隧道的设计行车速度 80 km/h, 并确保驾车到达距洞口一个停车距离(100 m)处时车速达到隧道的设计行车速度 80 km/h 左右, 然后尽量使行车速度稳定在 80 km/h, 保持匀速行驶。车辆在行驶过程中不得变换车道。在车辆到达距隧道洞口一个安全停车距离前开始记录瞳孔数据, 通过隧道的入口段后停止记录。每座隧道、每个时段有 1~3 名驾驶员驾车通过; 根据具体情况, 每名驾驶员在一个时段驾车通过一座隧道 1~4 次。

1.3 测试结果

1.3.1 隧道洞外亮度 为了隧道照明设计的方便, 借用等效光幕亮度 L_{seq} 的概念表达驾驶员在距隧道

洞口一个停车视距处的适应亮度, 即采用了等效光幕亮度 L_{seq} 的计算方法, 但测量计算等效光幕亮度 L_{seq} 时未考虑汽车挡风玻璃透射比和亮度的影响。用在距隧道洞口一个停车视距处测量得到的隧道洞外景物亮度和在距隧道洞口一个停车视距处所拍照片计算等效光幕亮度 L_{seq} 。

计算得到的各测试时段各隧道的等效光幕亮度 L_{seq} 见表 1。

表 1 各隧道等效光幕亮度 L_{seq} 值

Table 1 L_{seq} values of tested tunnels

隧道名	测试时段	$L_{seq}/(\text{cd} \cdot \text{m}^{-2})$
龙井隧道	8月18日中午	162.6
	8月19日早晨	6.9
黄山岭隧道	8月20日中午	103.0
	8月20日傍晚	105.3
石背角隧道	8月19日中午	297.3
	8月19日傍晚	61.5
溪背山隧道	8月20日早晨	93.8
	8月19日中午	121.8
	8月19日傍晚	9.8

1.3.2 驾驶员瞳孔大小 测试共记录了 8 名驾驶员 56 人次驾车进入 4 座隧道的瞳孔变化数据。由于眼动仪校准不准确、眼动仪校准后头盔相对驾驶员的头部有运动等原因, 造成测试记录的 17 人次的瞳孔变化无法用于数据分析, 被判定为无效数据, 测试得到了 39 人次有效瞳孔变化数据。图 1(a) 是测试得到的一个驾驶员驾车进入其中一座隧道过程中的瞳孔大小变化曲线。为了便于分析驾驶员瞳孔大小变化规律, 采用小波变换的方法对测试得到的原始数据进行降噪处理, 图 1(b) 是对图 1(a) 所示数据通过小波变换降噪后的结果。

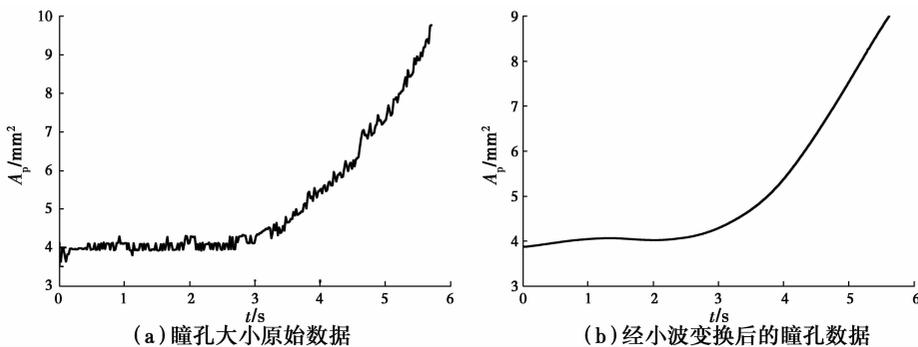


图 1 驾驶员瞳孔大小数据

Fig 1 Drivers' pupil size

2 驾驶员的瞳孔面积变化速率

驾驶员驾车进入隧道的过程中适应亮度不断变化,驾驶员的瞳孔大小也随之不断变化。如果适应亮度变化过快,驾驶员的瞳孔大小变化达到正常视觉的临界速率仍无法适应环境亮度,则会造成视觉障碍,进而导致交通事故。为了保证在此过程中的行车安全,需要控制驾驶员瞳孔大小的变化速率在安全范围内。

2.1 驾驶员瞳孔面积变化速率的计算

实测中使用的眼动仪每隔约 20 ms 记录一次瞳孔大小,即,先记录下 t 时刻的瞳孔大小 $f(t)$, 经历 Δt 时间(约 20 ms)后,记录下 $t+\Delta t$ 时刻的瞳孔大小 $f(t+\Delta)$ 。由于眼动仪记录瞳孔大小的时间间隔 Δt 非常短,可以近似认为驾驶员在 Δt 时间内的瞳孔变化速率保持不变,则 Δt 时间内的瞳孔变化速率 v_p 可以用式(1)计算得到。

$$v_p = \frac{f(t+\Delta) - f(t)}{\Delta t} \quad (1)$$

将测量得到的驾驶员瞳孔面积随时间变化的数据代入式(1),即得到相应的瞳孔面积变化速率,图 1 所示瞳孔大小变化过程的瞳孔面积变化速率如图 2 所示。

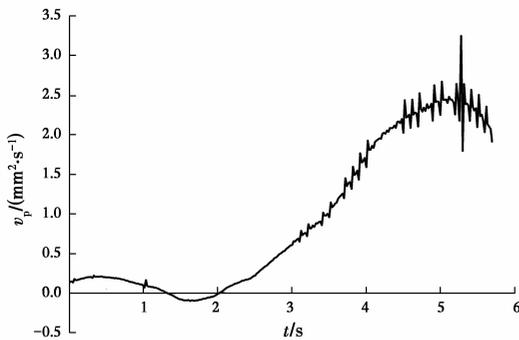


图 2 驾驶员瞳孔面积变化速率

Fig 2 Speeds of drivers' pupil area changes

2.2 驾驶员瞳孔面积变化速率的最大值

使驾驶员能产生正常视觉的瞳孔面积变化速率最大值称为瞳孔面积变化的临界速率,记为 v_{pe} 。在驾驶员驾车进入隧道过程中,影响行车安全的是驾驶员瞳孔面积变化速率的最大值 v_{pmax} ,如果 v_{pmax} 超过了驾驶员瞳孔变化的临界速率 v_{pe} ,驾驶员将形成视觉障碍而发生交通事故。

在驾驶员驾车进入隧道过程中,驾驶员瞳孔面积变化速率除受适应亮度变化的影响外,还受驾

驶员瞳孔大小个体差异等因素的影响。分析发现,在其他条件一定的情况下,将驾驶员在距隧道洞口一个停车视距处的瞳孔大小 S_{p100} 、适应亮度 L_{seq} 及隧道入口段亮度 L_{th} 作为影响驾驶员瞳孔面积变化速率的主要因素。测试时已要求驾驶员在进入隧道接近段之前就将车速提高到隧道的设计行车速度 80 km/h,并尽量保持该速度匀速进入隧道。测试中实际测到的行车速度 v 的最大值为 86 km/h,最小值为 76 km/h,对应的从隧道洞外 100 m 到洞内 30 m 所需行车时间分别为 5.44、6.16 s,相差只有 0.72 s。为了研究方便,将行车速度对驾驶员瞳孔大小变化带来的影响忽略不计,即未将行车速度作为影响驾驶员瞳孔大小变化的因素。

为了减小测试过程中可能产生的随机误差,在条件许可的情况下,对于相同的测试条件(同一测试时段、同一隧道、相同的洞外亮度 L_{seq} 和入口段亮度 L_{th}),同一位被测者可能进行了多次测试。在分析数据时将同一被测者在相同测试条件下得到的测试结果(v_{pmax} 、 S_{p100})取平均值。

为了得到驾驶员瞳孔面积变化最大值 v_{pmax} 与其各影响因素(S_{p100} 、 L_{seq} 、 L_{th})之间的关系,利用回归分析的方法建立 v_{pmax} 与 S_{p100} 、 L_{seq} 、 L_{th} 之间数学关系式,如式(2)所示。

$$v_{pmax} = a \cdot S_{p100} + b \cdot \ln L_{th} + c \cdot \ln L_{seq} + d \quad (2)$$

式中: v_{pmax} 为驾驶员瞳孔面积变化速率的最大值, mm^2/s ; S_{p100} 为驾驶员在距隧道洞口 100 m 处的瞳孔面积, mm^2 ; L_{seq} 为距隧道洞口 100 m 处的适应亮度,即隧道的洞外亮度, cd/m^2 ; L_{th} 为隧道入口段的路面亮度, cd/m^2 ; a 、 b 、 c 、 d 为系数。

利用实测得到的各变量的值对式(2)进行回归计算,计算结果见表 2。

表 2 驾驶员瞳孔面积变化速率最大值表达式拟合结果

Table 2 Fitting results of drivers' pupil area maximum change speed expression

a	b	c	d	R^2	SE
0.627 9	-0.296 3	0.243 3	0.282 6	0.867 5	0.249 4

从表 2 所列结果可以看出,式(2)能比较准确地表达驾驶员驾车进入隧道过程中瞳孔面积变化速率最大值 v_{pmax} 与驾驶员瞳孔大小 S_{p100} 、隧道洞外亮度 L_{seq} 及隧道入口段亮度 L_{th} 之间的关系。

3 隧道入口段亮度的确定

3.1 测试隧道入口段亮度的确定

式(2)描述了驾驶员驾车进入隧道过程中瞳孔面积变化最大速率 v_{pmax} 与驾驶员在隧道洞外的瞳孔面积 S_{p100} 、隧道洞外亮度 L_{seq} 、隧道入口段亮度 L_{th} 之间的关系。式(2)可以改写为

$$L_{th} = \exp\left(\frac{v_{pmax} - a \cdot S_{p100} - c \cdot \ln L_{seq} - d}{b}\right) \quad (3)$$

在已知驾驶员瞳孔面积变化最大速率 v_{pmax} 、驾驶员在隧道洞外的瞳孔面积 S_{p100} 和隧道洞外亮度 L_{seq} 的情况下,可以按式(3)计算得到相应的隧道入口段亮度。驾驶员瞳孔面积变化的临界速率 v_{pe} 是在保证驾驶员正常视觉功能的前提下所允许的瞳孔面积变化速率的最大值,如果将式(3)中的瞳孔面积变化最大速率 v_{pmax} 取值为驾驶员瞳孔面积变化的临界速率 v_{pe} ,则按式(3)计算得到的隧道入口段亮度 L_{th} 即为在特定的隧道洞外亮度条件下、确保该驾驶员不出现视觉障碍所允许的隧道入口段亮度的最小值。即,对于特定的驾驶员和特定的隧道洞外亮度,保证行车安全所需的隧道入口段亮度可以按照式(4)计算得到。

$$L_{th} = \exp\left(\frac{v_{pe} - a \cdot S_{p100} - c \cdot \ln L_{seq} - d}{b}\right) \quad (4)$$

驾驶员瞳孔面积变化临界速率可以按式(5)计算得到^[16]。

$$v_{pe} = 0.6715 S_{p100} \quad (5)$$

将测量得到的 S_{p100} 和 L_{seq} 、计算得到的 v_{pe} 及表 2 所列参数 a 、 b 、 c 、 d 的取值代入式(4),即可计算得到各隧道在各测试时段保证各驾驶员行车安全的入口段亮度。

为了减小测试产生的随机误差,提高测试精度,在条件许可的情况下,有的隧道在同一测试时段(对应同一个洞外亮度)进行了多次测试。根据对不同测试者的测试结果计算得到的同一隧道在同一时段的入口段亮度值不完全相同,即使是根据同一测试者的多次测试结果计算得到的同一隧道在同一时段的入口段亮度值也不完全相同,但根据不同测试结果计算得到的同一隧道在同一时段的入口段亮度值差别不大。如果以同一隧道在同一时段的多次测试的计算结果中最小的隧道入口段亮度值为准,则基于不同测试的计算结果相对误差最大值仅为 11.97%,因此,可以近似认为根据同一隧道在同一

时段的不同测试结果计算得到的隧道入口段亮度相同,即隧道入口段亮度与洞外亮度一一对应。为了描述隧道入口段亮度与洞外亮度之间的关系,对根据同一隧道在同一时段的多次测试结果计算得到的多个入口段亮度取平均值,将该平均值作为该隧道在该时段(对应一个特定的洞外亮度)的入口段亮度,计算得到的各隧道在各测试时段的隧道入口段亮度及与洞外亮度的对应关系见表 3。

表 3 测试隧道在测试时段入口段亮度的计算值

Tab 3 Calculated threshold luminance of tested tunnel

隧道名	测试时段	$L_{seq}/(\text{cd} \cdot \text{m}^{-2})$	$L_{th}/(\text{cd} \cdot \text{m}^{-2})$
龙井隧道	8月18日中午	162.6	94.1
	8月19日早晨	6.9	6.9
黄山岭隧道	8月20日中午	103.0	78.8
	8月20日傍晚	105.3	66.9
石背角隧道	8月19日中午	297.3	191.2
	8月19日傍晚	61.5	45.3
溪背山隧道	8月20日早晨	93.8	56.4
	8月19日中午	121.8	91.0
	8月19日傍晚	9.8	10.9

3.2 隧道入口段亮度与洞外适应亮度的关系

表 3 所列计算得到的隧道入口段亮度 L_{th} 与隧道洞外亮度 L_{seq} 之间的关系如图 4 所示。

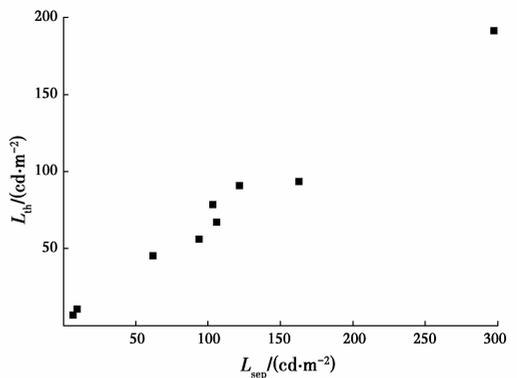


图 3 L_{th} 与 L_{seq} 的关系散点图

Fig 3 Scatter diagram of L_{th} to L_{seq}

从图 4 可以看出,隧道入口段亮度 L_{th} 与隧道洞外亮度 L_{seq} 之间基本呈现出线性相关关系。建立线性函数模型来描述 L_{th} 与 L_{seq} 之间的关系,见式(6)。

$$L_{th} = p \cdot L_{seq} + q \quad (6)$$

式中: p 、 q 为系数。利用表 3 中所列数据对式(6)进行拟合计算。拟合计算结果: $p=0.62$ 、 $q=4.88$ 。式(6)即为

$$L_{th} = 0.62L_{seq} + 4.88 \quad (7)$$

拟合计算的复相关系数 $R^2=0.98$, 标准差 $SE=7.72$ 。根据拟合结果计算得到的隧道入口段亮度与表3中所列根据实测结果计算得到的隧道入口段亮度之间的相对误差见表4。

表4 拟合结果与实测结果之间的相对误差

Table 4 Relative error of fitting results to measured results

隧道名	测试时段	$L_{seq}/$ ($cd \cdot m^{-2}$)	$L_{th}/$ ($cd \cdot m^{-2}$)	$L'_{th}/$ ($cd \cdot m^{-2}$)	$E/\%$
龙井 隧道	8月18日中午	162.6	94.1	105.9	12.53
	8月19日早晨	6.9	6.9	9.2	32.85
黄山岭 隧道	8月20日中午	103.0	78.8	68.9	-12.61
	8月20日傍晚	105.3	66.9	70.3	5.07
石背角 隧道	8月19日中午	297.3	191.2	189.6	-0.86
	8月19日傍晚	61.5	45.3	43.1	-4.89
	8月20日早晨	93.8	56.4	63.1	11.97
溪背山 隧道	8月19日中午	121.8	91.0	80.5	-11.49
	8月19日傍晚	9.8	10.9	11.0	0.63

表4中 L'_{th} 为根据拟合结果计算得到隧道入口段亮度; E 为拟合结果与实测数据之间的相对误差。从拟合计算的结果来看,式(7)能比较准确地表达表3中所列 L_{th} 与 L_{seq} 之间的关系。从表4可以看出,实测到的洞外亮度最小值为 $L_{seq}=6.9 \text{ cd/m}^2$, 与之对应的根据测试结果计算得到的隧道入口段亮度 $L_{th}=6.9 \text{ cd/m}^2$, 根据拟合结果计算得到的隧道入口段亮度 $L'_{th}=9.2 \text{ cd/m}^2$, 该条件下的拟合结果与根据实测数据计算结果之间的相对误差达到了32.85%, 是各隧道在各照明条件下拟合结果与实测计算结果之间相对误差的最大值。除此之外,其余拟合结果与根据实测数据计算结果的相对误差都在15%以内。分析最大误差产生的原因,应该与测试时洞外亮度和隧道入口段亮度都比较低有关,测试过程中产生比较小的绝对误差,对比较低的亮度条件计算都可能产生比较大的相对误差。从其对隧道照明设计的影响来看,仅有测试的最低亮度条件下产生了较大的误差,其余测试条件下的误差都在15%以内,说明用式(7)描述 L_{th} 与 L_{seq} 之间的关系时,仅在低亮度条件下可能产生较大误差,在其余亮度条件下的计算结果基本都能满足隧道照明设计的精度要求。CIE 88:2004 建议^[12],在隧道照明设计过程中计算隧道洞外亮度时,采用每年至少出现

75 h的最大景物亮度作为计算基础,即在隧道照明设计时考虑的是相对较高的景物亮度,不会出现 $L_{seq}=6.9 \text{ cd/m}^2$ 的情况。从这个角度来看,表4中出现的最大误差条件不会在隧道照明设计的实践中出现,式(7)表达的隧道入口段亮度 L_{th} 与洞外亮度 L_{seq} 之间的关系能满足隧道照明设计的精度要求。

需要说明的是,用来描述隧道入口段亮度 L_{th} 与洞外亮度 L_{seq} 之间函数关系的式(7)是在行车速度为80 km/h左右的测试条件下得到的。由于驾驶员瞳孔面积变化速率最大值除了受数据分析过程中已经考虑的驾驶员在隧道洞外的瞳孔面积 S_{p100} 、隧道洞外亮度 L_{seq} 、隧道入口段亮度 L_{th} 等变量的影响外,还受行车速度的影响。因此,式(7)成立的前提条件是行车速度为80 km/h左右,即式(7)仅适用于设计行车速度为80 km/h左右的隧道照明设计。

4 结论

通过实测得到了驾驶员驾车进入隧道过程中瞳孔面积变化速率的最大值,在此基础上分建立了描述驾驶员驾车进入隧道过程中瞳孔面积变化速率最大值与各相关参数之间关系的数学模型。用驾驶员不发生视觉障碍的瞳孔面积变化临界速率为基准,计算得到了驾驶员瞳孔面积变化达到临界速率时隧道入口段的最低亮度。分析隧道入口段亮度与洞外亮度之间的关系,用回归分析的方法建立了隧道入口段亮度与洞外亮度之间关系的数学模型。该方法即为根据驾驶员视觉适应确定隧道入口段亮度的方法。

由于实测条件的限制,仅对设计行车速度为80 km/h的隧道进行了实测,实测的行车速度也都在80 km/h左右,在隧道入口段亮度计算模型建立过程中,无法将行车速度作为变量考虑。但已有研究表明,行车速度是决定隧道入口段亮度的关键参数之一。因此,建立的隧道入口段亮度计算模型仅适用于设计行车速度为80 km/h左右的公路隧道。对于其他不同设计行车速度的公路隧道,还需要进行相应的实测分析,才能建立其入口段亮度计算模型。

参考文献:

- [1] CIE. Guide for the lighting of road tunnels and underpasses; CIE 88-1990 [R]. CIE Central Bureau, 1990.
- [2] CIE. Guide for the lighting of road tunnels and

- underpasses: CIE 88: 2004 [R]. CIE Central Bureau, 2004.
- [3] Japanese Standards Association. Light of tunnels for motorized traffic: JIS Z 9116-1990 [S]. Japanese Standards Association, 1991.
- [4] CEN. Lighting applications-Tunnel lighting: CR 14380-2003 [R]. European Committee for Standardization, 2003.
- [5] BSI. Code of practice for the design of road lighting-Part 2: Lighting of tunnels [S]. London, UK, 2008.
- [6] Norwegian Public Roads Administration. Road tunnels [M]. NPRA Printing Center, 2004.
- [7] 中华人民共和国交通部. 公路隧道通风照明设计规范: JTJ 026.1-1999 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2000. Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of ventilation and lighting of highway tunnel: JTJ 026.1-1999 [S]. Beijing: China Communications Press, 2000. (in Chinese)
- [8] 中华人民共和国交通运输部. 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. Guidelines for design of lighting of highway tunnels: JTG/T D70/2-01-2014 [S]. Beijing: China Communications Press, 2014. (in Chinese)
- [9] 杜志刚, 潘晓东, 郭雪斌. 高速公路隧道进出口视觉适应实验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(12): 1998-2001. DU Z G, PAN X D, GUO X B. Experimental studies of visual adaptation on driving through freeway tunnel's entrance and exit [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(12): 1998-2001. (in Chinese)
- [10] 胡松洁. 承德地区高速公路短隧道照明研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2010. HU S J. The research in short tunnel lighting of highway in the region of Chengde [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [11] 殷颖, 陈仲林, 崔璐璐. 隧道入口段亮度计算方法比较研究[J]. 灯与照明, 2008, 32(2): 20-24. Yin Y, Chen Z L, Cui L L. Comparative study on the computing method of luminance of tunnel threshold zone [J]. Light & Lighting, 2008, 32(2): 20-24. (in Chinese)
- [12] 殷颖. 隧道入口段亮度计算方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008. Yin Y. Study on the computing method of luminance of tunnel threshold zone [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008. (in Chinese)
- [13] 胡英奎, 翁季, 张青文, 等. 基于驾驶员瞳孔变化确定隧道入口段亮度的方法[J]. 灯与照明, 2011, 35(4): 10-13. HU Y K, WENG J, ZHANG Q W, et al. Calculation method of road tunnel threshold zone luminance based on drivers' pupil size change rules [J]. Light & Lighting, 2011, 35(4): 10-13. (in Chinese)
- [14] 胡英奎, 陈仲林, 张青文, 等. 驾车接近隧道过程中驾驶员瞳孔大小变化规律[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(6): 106-113. HU Y K, CHEN Z L, ZHANG Q W, et al. Changing rule of drivers' pupil size as driving into tunnels [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(6): 106-113. (in Chinese)
- [15] 胡英奎, 陈仲林, 张青文, 等. 驾车接近隧道过程中驾驶员的适应亮度变化规律[J]. 重庆大学学报, 2016, 39(1): 98-104. HU Y K, CHEN Z L, ZHANG Q W, et al. Drivers' adaptation luminance changing rule when driving into tunnels [J]. Journal of Chongqing University, 2016, 39(1): 98-104. (in Chinese)
- [16] 胡英奎. 基于视觉适应的公路隧道入口段亮度研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013. HU Y K. Study on the luminance of road tunnel threshold zone based on drivers' visual adaptation [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)