

激光与光电子学进展

隧道灯具配光曲线优化及布灯参数影响研究

严晓龙*, 冯莹莹

阜阳师范大学信息工程学院, 安徽 阜阳 236041

摘要 从隧道照明亮度均匀度出发,以《公路隧道照明设计细则》的评价标准为约束条件,利用逐点法优化建立了一种基于隧道结构参数的灯具配光模型。通过DIALUX光学软件构建仿真隧道场景,将隧道结构参数代入该灯具配光模型计算出适配的灯具配光曲线,并对设计灯具的照明性能进行了实验验证。结果表明,采用该模型设计的照明灯具,可以保证隧道环境的平均照度、平均亮度、亮度均匀度和纵向亮度均匀度均满足国家评价标准。此外,在实验中通过调节多项隧道参数(布灯方式、灯具安装仰角和安装间距),对照明质量进行对比分析,得出设计灯具在初始隧道参数下照明质量和节能性均最佳的结论,验证了隧道灯具配光模型的高效性,并证明了该模型在隧道灯具设计领域具有很好的应用推广价值。

关键词 表面光学; 亮度均匀度; 配光曲线; 逐点法; 照明质量

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2124001

Study on Optimization of Light Distribution Curve of Tunnel Lamps and Influence of Lamp Layout Parameters

Yan Xiaolong*, Feng Yingying

College of Information Engineering, Fuyang Normal University, Fuyang 236041, Anhui, China

Abstract This study begins from the tunnel lighting's brightness uniformity, which takes the evaluation standard of detailed rules for highway tunnel lighting design as the constraint condition, and a light distribution model of lamps based on tunnel structural parameters is created using the point by point approach. The simulation tunnel scene is constructed using DIALUX, the tunnel structure parameters are brought into the lamplight distribution model, and a suitable lamp light distribution curve is computed, the designed lamps' lighting performance is confirmed using experiments. The findings demonstrated that the lighting fixtures created with this model can guarantee the tunnel environment's average illuminance, average brightness, brightness uniformity, and longitudinal brightness uniformity match the national evaluation standards. Furthermore, the lighting quality is compared and examined by adjusting numerous tunnel parameters in the experiment (light distribution mode, lamps' installation elevation, and installation spacing), and it is concluded that the designed lamps provide the best lighting quality and energy savings under the initial tunnel parameters. The efficiency of the tunnel lamps light distribution model is confirmed and demonstrates that the model has good application and popularization value in the tunnel lamp design field.

Key words optics at surfaces; brightness uniformity; light distribution curve; point by point method; lighting quality

1 引言

我国的地形种类复杂多样,其中丘陵和山区占比较大,约占国土面积的2/3。在山区搭建道路,隧道的建设和维护不可或缺。由于隧道和传统的道路区别较大,其驾驶环境较为密封,且在白天和夜晚均需要提供舒适的视看环境,隧道照明的安全和能耗问题尤为突

出^[1]。因此,如何保障舒适安全的隧道驾驶环境并提升灯具节能性,是当下全球道路照明领域的热点问题^[2-3]。

目前,在隧道照明性能与节能领域,主要从灯具配光、布灯配置方向进行研究。在灯具配光方向:Dong等^[4-5]研究了LED光源色温对人眼视看效果和隧道暗适应的影响,提出了一种适合隧道入口处的LED照明

收稿日期: 2021-09-21; 修回日期: 2021-10-21; 录用日期: 2021-11-02

基金项目: 安徽高校自然科学基金项目(KJ2020A1216)、阜阳师范大学信息工程学院自然科学基金项目(FXG2020ZY03)

通信作者: *ahkami0111@163.com

灯具(色温 4000~4500 K); Gadegaard 等^[6-7]利用自由曲面反射器优化了 LED 灯具的照明质量; 曾翌等^[8]利用边缘光线理论和折射定律设计了双自由曲面透镜, 从而优化了照明灯具的照度均匀度和能量利用率。在布灯配置方向: 孙焱等^[9]定量研究了隧道灯具布置方式和安装参数, 并基于此评价了灯具的节电性能; Musa 等^[10]设计了一套动态适应隧道视看环境的照明系统, 经实验验证, 能量利用率提升 22.1%。但是, 上述方法通常在单一的隧道环境下进行灯具研究, 当把照明方案推广到多样的隧道尺寸结构中时, 灯具配光曲线或布灯参数会存在较大的实际误差。

本文从照明亮度均匀度出发, 针对不同隧道尺寸结构, 对隧道照明灯具配光曲线进行设计并建立配光模型, 利用逐点法优化灯具配光参数, 在提升灯具设计的照明质量的同时, 保证高效的节电性能。

2 隧道灯具配光曲线模型

隧道照明质量与灯具配光曲线有很大关系, 而配光曲线又受到布灯方式、安装距离、安装高度和仰角等因素影响。此外, 由于当前我国山区隧道通常采用两侧布灯, 且以对称布灯居多, 因此本文基于该类型隧道环境, 对灯具进行配光研究。

2.1 隧道灯具配光模型

在横向方向上, 为保证各干、支道上的照明均匀度, 且不浪费灯具发光能量, 灯具的横向配光范围应严格按照隧道横向结构参数进行设计, 隧道横向结构及灯具横向配光范围如图 1 所示。

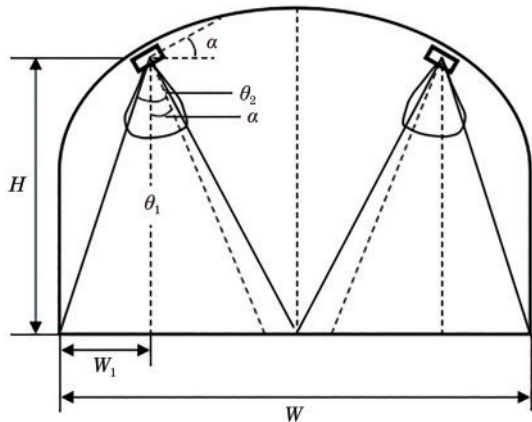


图 1 隧道灯具横向配光图

Fig. 1 Transverse light distribution diagram of tunnel lamps

图 1 中, H 为灯具安装高度, W 为隧道宽度, W_1 为灯具到隧道墙面的距离, α 为灯具安装仰角, θ_1 、 θ_2 分别为灯具垂直线左侧和右侧的发光角。

在纵向方向上, 由于我国隧道施工通常采用两侧对称布灯, 有可能造成道路出现“斑马效应”, 因此需要进行纵向宽光型配光设计, 保证道路纵向亮度均匀度, 如图 2 所示。

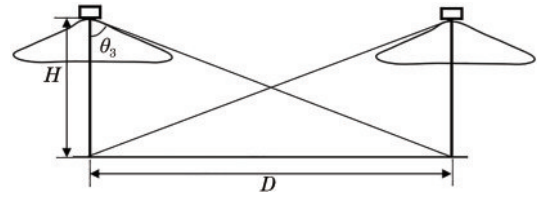


图 2 隧道灯具纵向配光图

Fig. 2 Longitudinal light distribution diagram for tunnel lamps

图 2 中, D 为布灯间距, θ_3 为灯具纵向发光角。

由图 1 和图 2 可知, 灯具的横向及纵向配光曲线模型表示为

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{W_1}{H}\right) + \alpha, \quad (1)$$

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{W - 2W_1}{2H}\right) - \alpha, \quad (2)$$

$$\theta_3 = \arctan\left(\frac{D}{H}\right). \quad (3)$$

2.2 DIALUX 隧道建模

由于不同地区隧道尺寸参数存在差异, 本文选取常规参数, 利用 DIALUX 光学软件进行隧道仿真建模。该隧道模型设置为对向两车道, 纵向长度为 120 m, 横向宽度为 15 m, 单车道宽度为 3.75 m, 隧道高度为 7 m, 隧道内采用双侧对称布灯, 灯具安装高度为 6 m, 灯具距离垂直墙面为 0.5 m, 灯具间距为 9 m, 安装仰角为 15°。仿真模型如图 3 所示。

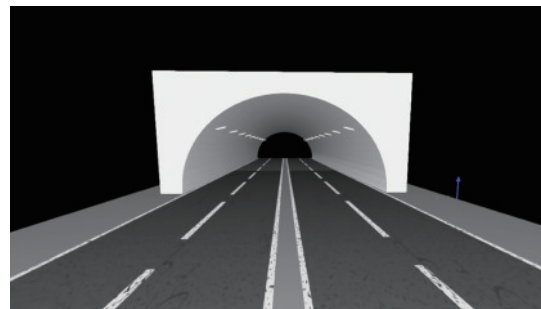


图 3 隧道建模图

Fig. 3 Tunnel modeling diagram

2.3 灯具极坐标配光曲线

对于图 3 隧道模型, 利用本文建立的隧道灯具配光模型对照明灯具的配光参数进行计算, 灯具的发光角参数如表 1 所示, θ 为横向总发光角。

表 1 灯具各方向发光角参数

Table 1 Lighting angle parameters of lamps in all directions

$\theta_1 / (^\circ)$	$\theta_2 / (^\circ)$	$\theta / (^\circ)$	$\theta_3 / (^\circ)$
19.76	34.40	54.16	56.31

除了要对灯具发光角度进行计算, 还要对灯具在各个方向上的发光强度进行计算, 而目前主流的光强计算方法为逐点法。在隧道中间段选取一定的计算区

域,在区域内设置平均分布的 $m \times n$ 个采集点,采集点坐标为 $(x_i, y_j), i \in [1, m], j \in [1, n]$ 。对区域内各采集点进行累加计算。计算区域如图 4 所示。

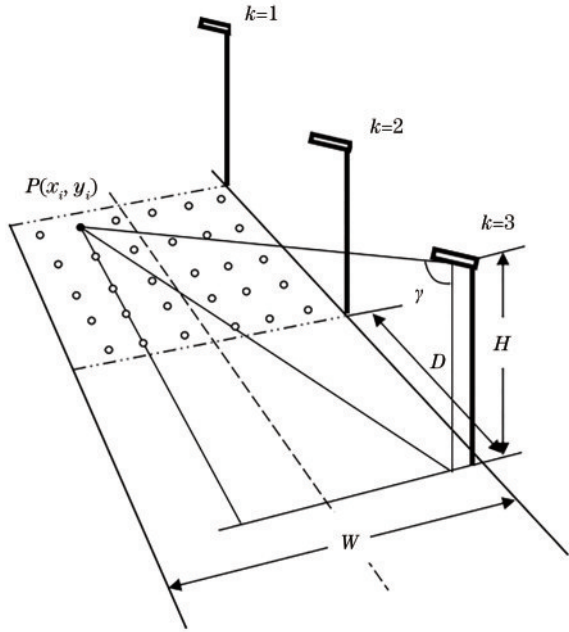


图 4 逐点法计算区域

Fig. 4 Calculation area by point method

利用上述计算区域内各采集点的照度、入射角等数据,代入光强分布公式,从而可以实现对灯具各方向上的光强计算^[11]。

$$I_{\gamma} = \frac{1000 \times E_{pi} \times H^2}{\cos^3 \gamma \times \Phi \times M}, \quad (4)$$

式中: E_{pi} 为 P 点位置灯具的水平照度(单位: lx); I_{γ} 为 P 点位置灯具发出的光强值(单位: cd); γ 为灯具在 P 点的入射角(单位: $^{\circ}$); M 为养护系数,取值范围 0.6~0.7; Φ 为灯具的光通量(单位: lm)。

此外,根据我国颁布的《公路隧道照明设计细则》可知,隧道灯具需要满足路面平均照度 E_{av} 、道路平均亮度 L_{av} 、亮度均匀度 U_0 和纵向亮度均匀度 U_L 等多方面标准^[11],评价标准如表 2 所示。

表 2 主干道评价标准

Table 2 Evaluation standard of trunk road

E_{av} /lx	L_{av} /($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)	U_0	U_L
≥ 20	≥ 1.5	≥ 0.4	≥ 0.7

表 2 中,平均照度 E_{av} 和平均亮度 L_{av} 用于评价灯具对人眼视觉灵敏度的影响。亮度均匀度 U_0 用于评价灯具的照明质量,纵向亮度均匀度 U_L 用于衡量视看环境是否存在“斑马效应”。各项评价标准的计算公式表示为

$$E_{av} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^K E_k(x_i, y_j)}{mn}, \quad (5)$$

$$L_{av} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^K L_k(x_i, y_j)}{mn}, \quad (6)$$

$$U_0 = \frac{\min[\sum_{k=1}^K L_k(x_i, y_j)]}{L_{av}}, \quad (7)$$

$$U_L = \frac{\min[\sum_{k=1}^K L_k(x_i, y_{center})]}{\max[\sum_{k=1}^K L_k(x_i, y_{center})]}, \quad (8)$$

式中: k 表示影响计算区域的灯具数量。

由式(5)~(8)可知,四项评价指标均与照度、亮度有关,而路面的照度和亮度受灯具光强直接影响,因此为保证本文设计的隧道照明灯具符合上述评价指标,保证灯具配光曲线的高效性,以表 2 为约束条件代入式(4)对灯具光强进行优化,并结合表 3 的发光角参数,灯具的归一化配光曲线如图 5 所示。

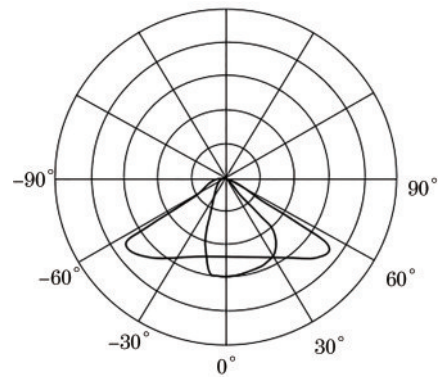


图 5 灯具的归一化配光曲线

Fig. 5 Normalized light distribution curve of lamps

2.4 配光曲线仿真分析

以 2.2 节建立的隧道环境为实验场景,将上述优化的灯具配光曲线生成 IES 文件,代入 DIALUX 软件进行道路实景模拟,各项评价指标如表 3 所示。

表 3 所设计灯具的评价指标

Table 3 Evaluation index of the designed lamps

E_{av} /lx	L_{av} /($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)	U_0	U_L
94.4	5.39	0.90	0.99

由表 3 可知,利用隧道灯具配光模型设计的配光曲线在模拟隧道环境下均满足《公路隧道照明设计细

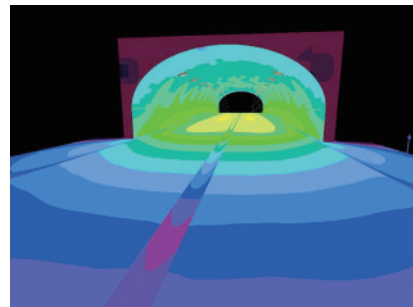


图 6 隧道照明效果伪色图

Fig. 6 Pseudo color map of tunnel lighting effect

则》的各项评价指标,可以为隧道提供高质量的照明环境。隧道照明环境伪色图如图 6 所示。

3 不同布灯方式和安装参数对照明质量影响分析

由 2.1 节对隧道灯具配光模型的研究可知,灯具安装参数主要有:灯具安装高度 H 、灯具安装间距 D 、和灯具仰角 α 。不同的布灯方式和安装参数会影响灯

具的实际光效,而在隧道模型确定的情况下,灯具的安装高度相对固定,因此本节重点对布灯方式、灯具仰角和灯具安装间距进行实验对比分析。

3.1 对称布灯和交错布灯对比

由于我国隧道照明布灯方式多采用两侧对称布灯和交错布灯,因此在本文隧道模型中,利用 DIALUX 软件对设计灯具的两种布灯方式进行仿真实验,平面布置如图 7 所示。

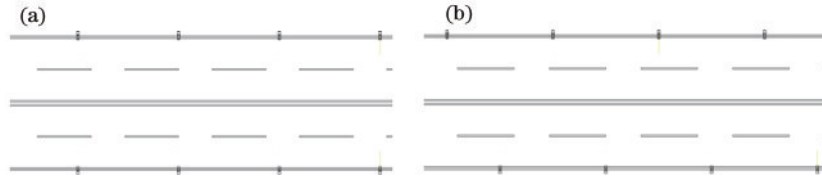


图 7 隧道照明的布灯方式。(a)对称布灯;(b)交错布灯

Fig. 7 Lighting distribution mode of tunnel lighting. (a) Symmetrical lighting; (b) staggered lighting

在灯具安装高度 H 、灯具安装间距 D 、和灯具仰角 α 均不变的情况下,两侧对称布灯和交错布灯在计算区域内的评价指标值如表 4 所示。其中,平均照度图和平均亮度图如图 8、9 所示。由表 4 可知,本文设计的隧道灯具在对称布灯方式下,各项评价指标均优于交错布灯,但优势不大。对称布灯相比于交错布灯,隧道平均照度和平均亮度分别提升 5% 和 4%,亮度均匀度提升 10%。用于评价是否存在“斑马效应”

表 4 两种布灯方式下的隧道路面评价指标

Table 4 Evaluation indexes of tunnel pavement under two lighting modes

Lighting mode	E_{av} / lx	$L_{av} / (cd \cdot m^{-2})$	U_0	U_L
Symmetrical lighting	94.40	5.39	0.90	0.99
Staggered lighting	89.64	5.14	0.82	0.98

的纵向亮度均匀度,在两种布灯方式下非常接近,相差仅 1%。

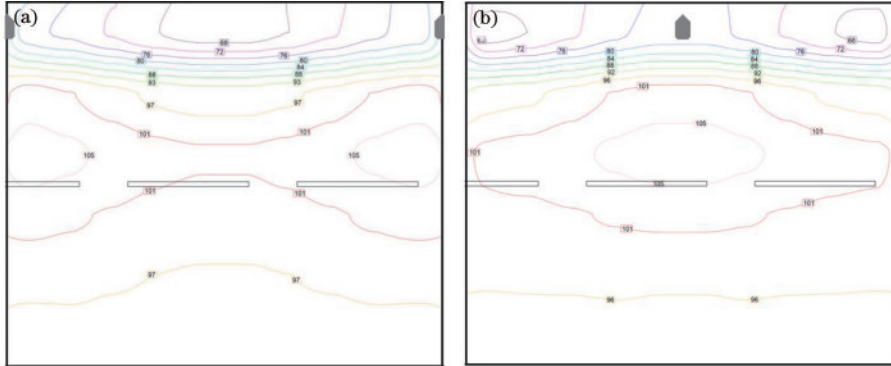


图 8 两种布灯方式下的隧道等照度曲线对比图。(a)对称布灯;(b)交错布灯

Fig. 8 Comparison diagram of tunnel isoilluminance curve under two lighting modes. (a) Symmetrical lighting; (b) staggered lighting

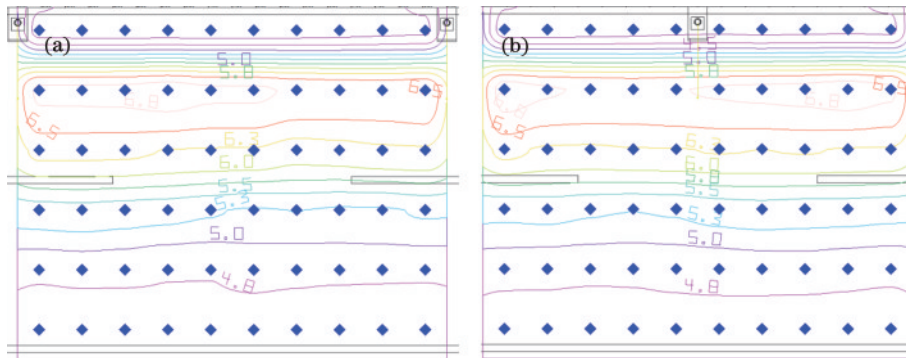


图 9 两种布灯方式下的隧道平均亮度对比图。(a)对称布灯;(b)交错布灯

Fig. 9 Comparison diagram of tunnel average brightness under two lighting modes. (a) Symmetrical lighting; (b) staggered lighting

3.2 不同灯具仰角对比

我国《公路隧道照明设计细则》规定,隧道灯具的安装仰角在 $0^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 范围内^[11]。不同安装仰角会对路面的亮度和照度分布造成很大影响,因此本节对 $0^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 范围内不同安装仰角下的隧道环境进行仿真实验,分析灯具的安装仰角对隧道照明评价指标的影响。

在本文隧道环境下,保持灯具安装高度 $H=6\text{ m}$,灯具安装间距 $D=9\text{ m}$,灯具距离垂直墙面 0.5 m ,以及两侧对称布灯方式,将安装仰角设置为从 0° 至 60° 等 5° 递增,隧道照明的各项评价指标值如表 5 所示。

表 5 不同安装仰角下计算区域内的评价指标

Table 5 Evaluation indexes in the calculation area under different installation elevation angles

$\alpha / (^{\circ})$	E_{av} / lx	$L_{av} / (\text{cd}\cdot\text{m}^{-2})$	U_0	U_L
0	83.5	4.76	0.54	0.98
5	88.7	4.97	0.72	0.98
10	92.8	5.12	0.81	0.98
15	94.4	5.39	0.90	0.99
20	92.8	4.98	0.70	0.99
25	87.8	4.66	0.58	0.98
30	81.1	4.25	0.47	0.97
35	74.2	3.84	0.44	0.96
40	66.8	3.42	0.44	0.98
45	59.9	3.04	0.47	0.97
50	52.8	2.67	0.50	0.95
55	46.0	2.31	0.55	0.95
60	39.2	1.96	0.60	0.95

由表 5 可知,当安装仰角为 15° 时,设计灯具在计算区域内的 4 项评价指标均达到最佳。不同安装仰角下的各项指标对比图,如图 10~13 所示。

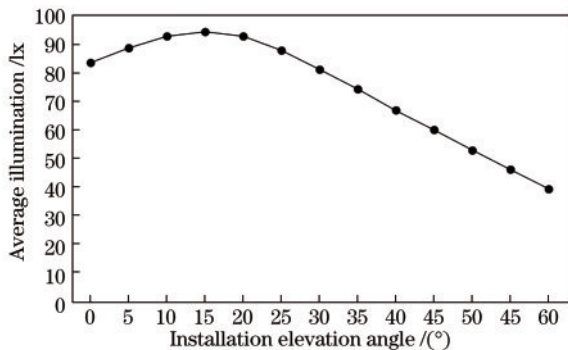


图 10 不同安装仰角下的隧道平均照度对比图

Fig. 10 Comparison of average illumination of tunnel under different installation elevation angles

由图 10 可知,当安装仰角为 15° 时,隧道路面的平均照度值达到最大值,为 94.4 lx ,且安装仰角在 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 范围内,隧道道路平均照度值均处在较高水平。

由图 11 可知,当安装仰角为 15° 时,隧道路面平均

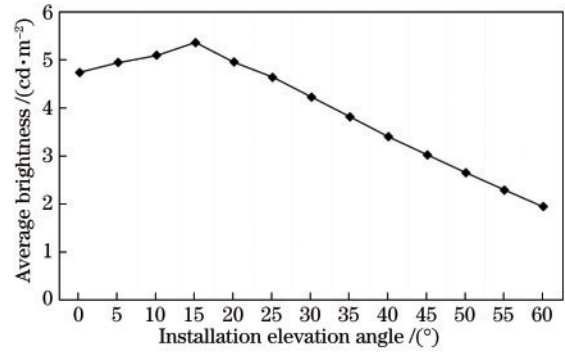


图 11 不同安装仰角下的隧道平均亮度对比图

Fig. 11 Comparison of average brightness of tunnel under different installation elevation angles

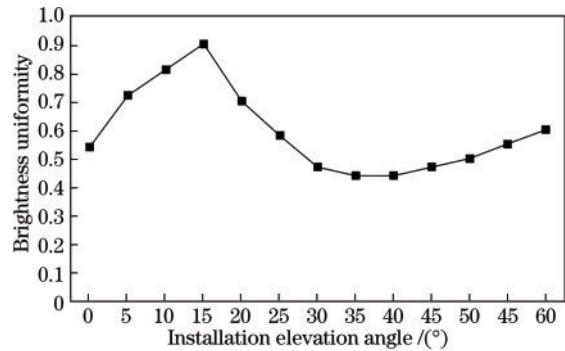


图 12 不同安装仰角下的隧道亮度均匀度对比图

Fig. 12 Comparison of brightness uniformity of tunnel under different installation elevation angles

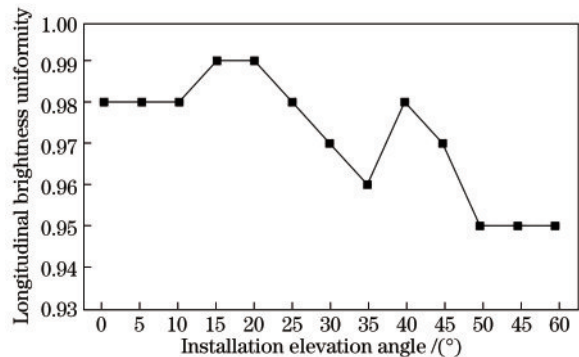


图 13 不同安装仰角下的隧道纵向亮度均匀度对比图

Fig. 13 Comparison of longitudinal brightness uniformity of tunnel under different installation elevation angles

亮度值最大,为 $5.39\text{ cd}/\text{m}^2$,可以为隧道内的驾驶人员提供明亮的视看环境。

由图 12、13 可知,当安装仰角为 15° 时,亮度均匀度和纵向亮度均匀度均达到最大值,分别为 0.90 和 0.99 ,隧道照明质量达到最佳,使得驾驶人员拥有非常均匀舒适的整体视看感受。当安装仰角为 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 时,纵向亮度均匀度均处在 0.99 最大值,隧道纵向方向上不会出现“斑马效应”,极大降低了隧道的安全隐患。

3.3 不同灯具安装间距

灯具安装间距是影响隧道照明质量的重要因素,不同的灯具安装间距会导致路面的亮度均匀度发生变化。由式(7)和式(8)可知,总体均匀度为计算区域内最小亮度和总体路面平均亮度之比,纵向均匀度为计算区域内最小亮度和路面最大亮度之比,而路面最大、最小和平均亮度均受到灯具安装间距的影响:安装间距过大会导致路面最小和平均亮度值过小,出现“斑马效应”从而造成安全隐患;安装间距过小会导致路面最大和平均亮度值过高,造成能源的浪费。因此本节基于模拟隧道环境进行仿真实验,定量分析不同灯具安装间距对隧道照明均匀度的影响。

仿真实验中,在保证其他实验参数不变的前提下,调整灯具安装间距从 3 m 到 30 m 等 3 m 递增,隧道路面总体均匀度和纵向均匀度如表 6 和图 14 所示。

表 6 不同灯具安装间距下的隧道亮度均匀度和纵向亮度均匀度
Table 6 Brightness uniformity and longitudinal brightness uniformity of tunnel under different lamp installation spacings

Lighting installation spacing / m	U_0	U_L
3	0.82	0.99
6	0.82	0.98
9	0.82	0.98
12	0.78	0.96
15	0.75	0.89
18	0.78	0.90
21	0.74	0.89
24	0.60	0.76
27	0.48	0.58
30	0.39	0.44

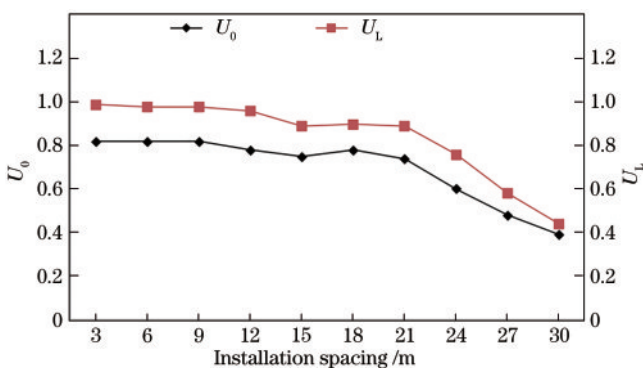


图 14 不同灯具安装间距下隧道亮度均匀度和纵向亮度均匀度对比图

Fig. 14 Comparison of tunnel brightness uniformity and longitudinal brightness uniformity under different lamp installation spacings

由表 6 和图 14 可知,随着灯具安装间距变大,亮度均匀度 U_0 和纵向亮度均匀度 U_L 整体呈现递减趋势,照明质量不断恶化。当灯具间距在 3~9 m 时,隧道路

面亮度均匀度和纵向亮度均匀度均处在最高水平,即隧道照明质量最佳;当灯具间距超过 12 m 时,亮度均匀度和纵向亮度均匀度均明显呈现递减趋势;当灯具间距达到 30 m 时,亮度均匀度和纵向亮度均匀度分别为 0.39 和 0.44,已不满足《公路隧道照明设计细则》亮度均匀度不得低于 0.4、纵向亮度均匀度不得低于 0.7 的规定。

此外,当灯具间距在 3~9 m 时,照明质量几乎持平,而灯具安装间距越小,隧道亮度越高带来的能源浪费等问题就会越突出,不同灯具间距下的隧道平均亮度如表 7 和图 15 所示。

表 7 不同灯具安装间距下的隧道平均亮度值
Table 7 Average brightness value of tunnel under different lamp installation spacings

Installation spacing / m	Average brightness / ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)
3	15.41
6	7.71
9	5.14

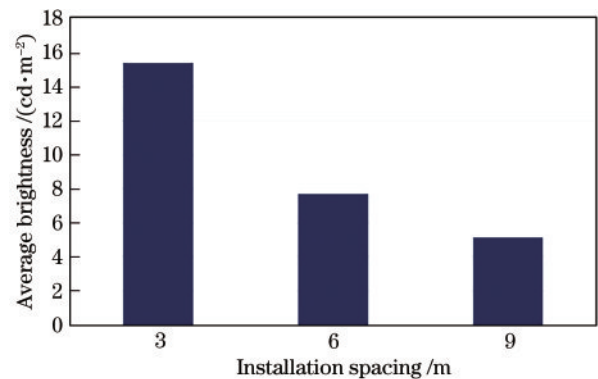


图 15 不同灯具安装间距下的隧道平均亮度对比图

Fig. 15 Comparison of average brightness of tunnel under different lamp installation spacings

由表 7 和图 15 可知:当灯具安装间距为 3 m 时,高出安装间距 9 m 的隧道平均亮度 199%;当灯具安装间距为 6 m 时,高出安装间距 9 m 的隧道平均亮度 50%,且均远高于 0.75 cd/m^2 的平均亮度评价标准(表 2)。综上所述,选取 9 m 的灯具安装间距,既可以保证隧道最佳照明质量,又可以实现灯具的高节能性。

4 结 论

本文从亮度均匀度出发,以隧道照明评价标准为约束,对隧道灯具配光曲线进行优化设计并建立灯具配光模型。通过 Dialux 软件构建隧道模型,利用灯具配光模型在该隧道环境下生成适配的灯具配光曲线,并对比分析该配光灯具的各项评价指标。仿真实验表明:

1) 隧道设计灯具的平均照度 E_{av} 、平均亮度 L_{av} 、亮度均匀度 U_0 和纵向亮度均匀度 U_L 均满足《公路隧道

照明设计细则》,可以提供高质量的隧道照明。

2) 利用该灯具配光模型设计的灯具,两种布灯方式(对称布灯和交错布灯)对隧道照明质量的影响差异较小,对称布灯略强于交错布灯。

3) 对设计灯具进行不同安装仰角和安装间距的仿真实验,实验结果表明,当设计灯具在安装仰角为 15° 和安装间距为 9 m 时,可以提供最佳的照明质量并降低能耗,从而验证了隧道灯具配光模型具有很好的实用推广价值。

参 考 文 献

- [1] 潘国兵,刘圳,李灵爱.公路隧道节能照明研究现状与展望[J].照明工程学报,2017,28(1):102-106.
Pan G B, Liu Z, Li L G. The present situation and development trends of tunnel lighting equivalent energy saving[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2017, 28(1): 102-106.
- [2] 赵太飞,马壮,李星善.基于小发散角LED的光源优化布局[J].激光与光电子学进展,2021,58(1):0106002.
Zhao T F, Ma Z, Li X S. Optimal layout of light source based on LED with small divergence angle[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(1): 0106002.
- [3] 陈玉芳,张昊,王敏,等.曲面近场发光二极管阵列照度均匀性分析与设计[J].激光与光电子学进展,2020,57(16):161101.
Chen Y F, Zhang H, Wang M, et al. Analysis and design of illumination uniformity of curved near-field light emitting diode array[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(16): 161101.
- [4] Dong L L, Qin L, Xu W H, et al. The impact of LED correlated color temperature on visual performance under mesopic conditions[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(6): 8060507.
- [5] Dong L L, Shang X F, Zhao Y, et al. The impact of LED light color on the dark adaptation of human vision in tunnel entrances[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(5): 8201311.
- [6] Gadegaard J, Jensen T K, Jørgensen D T, et al. High-output LED-based light engine for profile lighting fixtures with high color uniformity using freeform reflectors[J]. Applied Optics, 2016, 55(6): 1356-1365.
- [7] Camponogara D, Vargas D R, Campos A, et al. Modelling and control of an optimized cascade structure for LED street lighting fixtures[C]//IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, October 25-28, 2012, Montreal, QC, Canada. New York: IEEE Press, 2012: 4575-4580.
- [8] 曾翌,赵会富,段文举.基于双自由曲面高距高比照度均匀的光学系统设计[J].光学学报,2020(24):2422001.
Zeng Y, Zhao H F, Duan W J. Design of optical system with illumination uniform and high distance-height ratio based on double freeform-surface[J]. Acta Optica Sinica, 2020(24): 2422001.
- [9] 孙焱,蔡彬峰,郑国平,等.隧道照明灯具安装方式及参数节能影响研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(S1):389-395,402.
Sun Y, Cai B F, Zheng G P, et al. Study on the influence of tunnel lighting system installation mode and parameters on energy saving[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(S1): 389-395, 402.
- [10] Musa M S, Nallagownden P, Chiu K W, et al. Design and development of intelligent adaptive tunnel lighting system[C]//2015 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON), October 19-20, 2015, Johor Bahru. New York: IEEE Press, 2015: 289-292.
- [11] 中华人民共和国交通运输部.公路工程技术标准:JTG B01—2014[S].北京:人民交通出版社,2015.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical standard of highway engineering: JTG B01—2014[S]. Beijing: China Communications Press, 2015.