

文章编号:1005-0523(2018)04-0053-07

公路隧道入口和过渡段照明布灯参数优化研究

杨超,肖宇

(华东交通大学机电与车辆工程学院,江西 南昌 330013)

摘要:为了得到高速公路隧道入口段和过渡段两侧对称布灯方式下的最优布灯参数,以总功耗最小为目标,以路面照度满足照明要求为约束条件,建立隧道入口段和过渡段两侧对称布灯方式下的参数优化模型。以九景高速公路雁列山隧道为例,通过优化模型求出布灯优化参数以及总功率,与该隧道的实际布灯情况进行了比较。结果表明,采用优化布灯参数的LED隧道照明系统,装灯总功率比该隧道的电磁感应灯方案的装灯总功率减少69.59%。利用DIALux软件对雁列山隧道的优化布灯参数进行仿真实验,验证优化模型的正确性。优化亮度适应曲线与理论亮度适应曲线的比较表明,优化的布灯方案同样能较好地满足视觉适应要求。

关键词:布灯参数;优化模型;节能;公路隧道;入口段;过渡段

中图分类号:U453.7

文献标志码:A

隧道洞内外亮度的巨大差异,使得驾驶员进入隧道将出现“黑洞”现象,影响行车安全。为了减弱该现象对行车安全的影响程度,隧道入口段和过渡段不得不加大布灯密度或增大灯具功率,提高隧道入口段和过渡段亮度,从而缩小洞内外亮度的差异。增大人工照明,虽然避免了“黑洞”现象,保证了行车安全,却带来了巨大能耗,提高了隧道运营成本。因此,高速公路隧道入口段和过渡段照明节能优化研究对安全行车和节能减排具有非常重要的意义^[1-2]。

近年来,有些学者对公路隧道入口段和过渡段的节能优化进行了研究。谢培^[3]采用南五台隧道入口区段实车实验方法,应用相关分析、回归分析等统计分析方法,得到驾驶人瞳孔面积随视觉适应时间与环境照度的数学模型,确定了隧道入口区段的照度参考值,为隧道入口区段进行照明优化提供了理论基础,有利于行车安全并一定程度上达到节能减排的效果。邱凡,等^[4]在CIE适应曲线的基础上推导出了洞外亮度变化时隧道过渡段的亮度需求公式,选取典型的照明区域作为研究对象,给出了动态调光方案:根据车流量和洞外亮度,实时地对照明亮度需求进行动态调节,实现节能。王少博^[5]选取一定样本量的驾驶人进行高速公路长隧道试验,对隧道各路段驾驶人注视参数变化规律进行分析,运用回归分析方法分析隧道入口段环境照度变化对驾驶人瞳孔面积影响,为隧道照明优化提供了理论研究基础。吴桂林,等^[6]结合云南保腾高速公路鹿山隧道内自然光以及自然光与LED灯复合照明下隧道不同纵深路面照度的实测数据,通过与规范规定值的对比分析研究,得到了隧道入口段各区段自然光、LED灯复合照明下隧道照度分布规律,并对节能效果进行了评价,为今后进一步合理利用自然光、人工光源进行隧道复合照明节能研究提供参考。赵炜华,等^[7]选用31名驾驶人进行昼间暗适应时间测定试验,运用统计分析方法,获得不同隧道环境照度下驾驶人暗适应时间,计算出加强照明各段最优长度。李靖,等^[8]从利用自然光进行隧道照明可以节能的角度出发,在研究隧道照明段落划分理论的基础上,提出了隧道延伸照明段落,即将隧道内入口段、过渡段中的一段或多段延伸至隧道外,运用自然光作为该部分照明段光源的方法。如能应用于实际,对提高隧道节能具有十分重要的意义。

收稿日期:2018-01-31

基金项目:国家自然科学基金项目(61463015)

作者简介:杨超(1969—),男,教授,博士,研究方向为隧道照明节能优化与节能控制。

黄力彬^[9]以上海长江隧桥中的长江隧道加强照明 LED 改造方案设计为例,总结出一套较为行之有效同时经济环保的高压钠灯改 LED 工程改造方案,为同类工程提供了借鉴。文献[10]提出了隧道入口段和过渡段两侧对称布灯方式下基于优化布灯参数和 CAN 总线的隧道照明节能方案,但没有建立具体的布灯参数优化模型。以上学者和研究人员都未对隧道入口段和过渡段建立布灯参数优化模型。本文选取公路隧道入口段和过渡段,采用两侧对称布灯方式,以灯具安装高度、安装仰角、灯具纵向间距、灯具横向间距以及单灯功率为优化参数,以照明总功耗最小为目标,建立布灯参数优化模型,并用照明设计软件 Dialux 进行仿真实验,检验模型的正确性,最后通过拟合亮度适应曲线,进一步说明优化模型的可行性。

1 照明公式

1.1 灯具发光强度

当灯具提供配光曲线图(表)时,偏离灯具光轴线 γ 角处的实际光强 $I_c(\gamma, \theta)$ 可按式(1)计算^[11]

$$I_c(\gamma, \theta) = I_{1000}(\gamma, \theta) \eta_0 \eta M p q / 1\ 000 \quad (1)$$

式中: θ 为光线所在配光剖面与 C0/180 配光剖面的夹角; $I_{1000}(\gamma, \theta)$ 为灯具配光曲线图(表)中与 γ 角和 θ 角对应的光强值, cd; η_0 为灯具光线输出率; η 为灯具利用系数; M 为灯具养护系数; p 为单灯功率, W; q 为灯具的发光效率, lm/W。

1.2 照度

如图 1 所示,当灯具具有 Y 方向上的仰角 ξ 时,灯具照射在 b 点的光线偏离灯具光轴线的角度 $\gamma = \arccos[(h \cos \xi + y \sin \xi) / (x^2 + y^2 + h^2)^{1/2}]$, 灯具在隧道路面计算区域内 b 点的水平照度可表示为^[10]

$$E_b = I_c(\gamma, \theta) h (x^2 + y^2 + h^2)^{-1.5} \quad (2)$$

式中: h 为灯具光源中心至路面的垂直距离, m。

1.3 亮度

1) 入口段亮度。入口段 TH1 的亮度按式(3)进行计算^[12]

$$L_{TH1} = k \cdot L_{20}(S) \quad (3)$$

式中: k 为入口段亮度折减系数; $L_{20}(S)$ 为洞外亮度, cd/m²。

根据文献[13],在入口段的前半部分,其亮度值维持在 L_{TH1} ,从入口段的后半部分开始,亮度值从 L_{TH1} 线性下降,到入口段和过渡段交界的地方其亮度值等于 $0.4 L_{TH1}$ 。

2) 过渡段亮度。过渡段亮度可按式(4)的亮度适应曲线进行计算^[13]

$$L_{TR} = L_{TH1} (1.9 + t)^{-14} \quad (4)$$

式中: t 为汽车进入过渡段后所经历的行驶时间。

2 布灯参数优化模型

根据公路隧道照明设计细则^[12],由外向里将隧道入口段划分为 TH1 和 TH2 两个照明段,将过渡段划分为 TR1, TR2 和 TR3 共 3 个照明段,其设计基准如下:

- 1) 入口段路面亮度应满足在设定的洞外亮度、行车速度和交通流量下的要求值;
- 2) 过渡段路面亮度应满足适应曲线规定的要求值;
- 3) 隧道两侧墙面 2 m 高范围内的平均亮度,不宜低于路面平均亮度的 60%。

另外,灯具与墙壁之间至少保持 0.4 m 的距离以便安装灯具。

如图 2 所示,当采用对称布灯方式时,在每个照明段内,设 $(A_{11}, A_{21}), (A_{31}, A_{41})$ 为相邻的两组灯具,所有灯具属于同一型号,且这些灯具的安装高度 h 、安装仰角 ξ 以及纵向安装间距 s 都保持一致; d_1 为两灯具之间

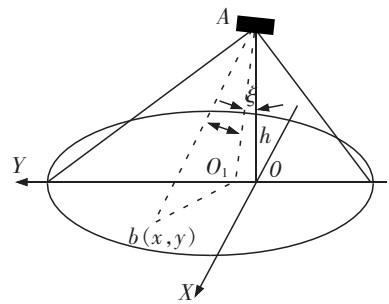


图 1 有仰角时单灯照明示意图

Fig.1 Schematic diagram of one lamp lighting with elevation angle

的横向安装间距, d_0 为行车道宽度, d 为隧道路面的总宽度;以隧道路面中线方向作为 X 轴,以路面宽度方向作为 Y 轴,以隧道高度方向作为 Z 轴,以灯具 $A_{11}, A_{21}, A_{31}, A_{41}$ 在路面上的投影点 $O_{11}, O_{21}, O_{41}, O_{31}$ 与隧道路面所围成的矩形区域 $B_1B_2B_4B_3$ 作为路面计算区域,以计算区域的中心点为原点 O ,建立空间直角坐标系; A_{li}, A_{2i} 分别为计算区域 $-X$ 方向的灯具($i=1, 2, \dots$), A_{3j}, A_{4j} 分别为计算区域 X 方向的灯具($j=1, 2, \dots$)。

隧道路面计算区域内任意一点 $b(x, y)$ 的总水平照度为

$$E_b = \sum E_{b1i} + \sum E_{b2i} + \sum E_{b3j} + \sum E_{b4j} \quad (5)$$

式中: $E_{b1i}, E_{b2i}, E_{b3j}, E_{b4j}$ 分别为灯具 $A_{li}, A_{2i}, A_{3j}, A_{4j}$

在计算区域 $b(x, y)$ 点产生的水平照度, $\sum E_{b1i}$,

$\sum E_{b2i}, \sum E_{b3j}, \sum E_{b4j}$ 分别为所有能照射到 b 点

的灯具 $A_{li}, A_{2i}, A_{3j}, A_{4j}$ 在 b 点产生的水平照度之和。

当 $s/2+x+(i-1)s \leq h \tan \alpha$ 时($i=1, 2, \dots$), 其中, α 为灯具轴向发光角度的一半

$$E_{b1i} = \frac{I_c(\gamma_{li}, \theta_{li})}{[s/2+x+(i-1)s]^2+(d/2+y)^2+h^2} \cdot \frac{h \sin \gamma_{li} / \cos \xi}{\{[s/2+x+(i-1)s]^2+(d/2+y-h \tan \xi)^2\}^{0.5}} \quad (6)$$

$$E_{b2i} = \frac{I_c(\gamma_{2i}, \theta_{2i})}{[s/2+x+(i-1)s]^2+(d/2+y)^2+h^2} \cdot \frac{h \sin \gamma_{2i} / \cos \xi}{\{[s/2+x+(i-1)s]^2+(d/2+y-h \tan \xi)^2\}^{0.5}} \quad (7)$$

当 $s/2-x+(j-1)s \leq h \tan \alpha$ 时($j=1, 2, \dots$)

$$E_{b3j} = \frac{I_c(\gamma_{3j}, \theta_{3j})}{[s/2+x+(i-1)s]^2+(d/2+y)^2+h^2} \cdot \frac{h \sin \gamma_{3j} / \cos \xi}{\{[s/2+x+(i-1)s]^2+(d/2+y-h \tan \xi)^2\}^{0.5}} \quad (8)$$

$$E_{b4j} = \frac{I_c(\gamma_{4j}, \theta_{4j})}{[s/2+x+(i-1)s]^2+(d/2+y)^2+h^2} \cdot \frac{h \sin \gamma_{4j} / \cos \xi}{\{[s/2+x+(i-1)s]^2+(d/2+y-h \tan \xi)^2\}^{0.5}} \quad (9)$$

式中: $\gamma_{li}, \gamma_{2i}, \gamma_{3j}, \gamma_{4j}$ 分别为灯具 $A_{li}, A_{2i}, A_{3j}, A_{4j}$ 照射在 b 点的光线与相应灯具光轴线的偏离角度; $\theta_{li}, \theta_{2i}, \theta_{3j}, \theta_{4j}$ 分别为灯具 $A_{li}, A_{2i}, A_{3j}, A_{4j}$ 照射在 b 点的光线与相应光轴线所构成的平面与 $C0/180$ 配光剖面之间的夹角。

入口段两侧对称布灯参数优化模型为

$$\left. \begin{aligned} \min P &= n_1 p = 2(D_{TH}/s)p \\ h - (d-d_1)/[2 \tan(\beta-\xi)] &\geq 2 \\ 2h \tan(\beta+\xi) &\geq (d_0-d_1) \\ h_{\min} &\leq h \leq h_{\max} \\ 0 &\leq \xi \leq \beta - \arctan[(d-d_1)/(2h-4)] \\ \text{st. } d_1^2/4 + (h-2)^2 &\leq 5^2 \\ E_1 &\leq E_{\min1} \leq 1.01E_1 \\ E_1 &\leq E'_{\min1} \leq 1.01E_1 \\ E_2 &\leq E_{\min2} \leq 1.01E_2 \\ E_2 &\leq E'_{\min2} \leq 1.01E_2 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: P 为灯具的总功率; p 为单个灯具的功率; D_{TH} 为入口段的长度; β 为灯具横向发光角度的一半; h_{\min} 为灯具安装高度的最小值; h_{\max} 为灯具安装高度的最大值; $E_{\min1}, E'_{\min1}$ 分别为 TH1 左车道、右车道路面中线上的最小照度; $E_{\min2}, E'_{\min2}$ 分别为 TH2 左车道、右车道路面中线上的最小照度; E_1, E_2 分别为 TH1, TH2 的照度要求值。

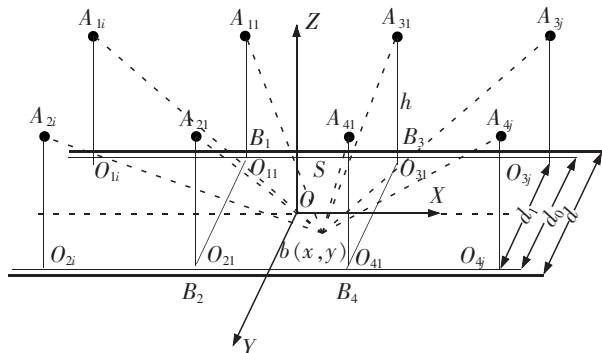


图 2 隧道照明对称布灯示意图

Fig.2 Schematic diagram of symmetrical luminaire-distribution-style tunnel lighting

过渡段两侧对称布灯参数优化模型为

$$\begin{aligned} \min P &= n_2 p = 2(D_{TR}/s)p \\ \text{st.} \quad & \begin{cases} h - (d - d_1) / [2 \tan(\beta - \xi)] \geq 2 \\ 2h \tan(\beta + \xi) \geq (d_0 - d_1) \\ h_{\min} \leq h \leq h_{\max} \\ 0 \leq \xi \leq \beta - \arctan[(d - d_1) / (2h - 4)] \\ d_1^2 / 4 + (h - 2)^2 \leq 5^2 \\ E_3 \leq E_{c\min 3} \leq 1.01 E_3 \\ E_3 \leq E'_{c\min 3} \leq 1.01 E_3 \\ E_4 \leq E_{c\min 4} \leq 1.01 E_4 \\ E_4 \leq E'_{c\min 4} \leq 1.01 E_4 \\ E_5 \leq E_{c\min 5} \leq 1.02 E_5 \\ E_5 \leq E'_{c\min 5} \leq 1.02 E_5 \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

式中： D_{TR} 为过渡段的长度； $E_{c\min 3}$ 、 $E'_{c\min 3}$ 分别为 TR1 左车道、右车道路面中线上的最小照度； $E_{c\min 4}$ 、 $E'_{c\min 4}$ 分别为 TR2 左车道、右车道路面中线上的最小照度； $E_{c\min 5}$ 、 $E'_{c\min 5}$ 分别为 TR3 左车道、右车道路面中线上的最小照度； E_3 、 E_4 、 E_5 分别为 TR1、TR2、TR3 的照度要求值。

3 实例分析

3.1 研究对象及优化条件

以江西九景高速公路雁列山隧道作为研究对象，该隧道由 1 号、2 号两座相连而成，全长 3 352 m，其中 1 号隧道长 1 533 m，2 号隧道长 1 819 m，均按平行双洞单向交通设计。单洞净宽 10.25 m，净高 7.425 m，行车道宽 7.5 m，设有人行检修道，设计交通量 1 200 辆/h，设计车速 80 km/h，入口段和过渡段均采用对称布灯形式。以 2 号隧道为例，隧道入口段 TH1、TH2 的长度均为 42 m，过渡段 TR1、TR2、TR3 的长度分别为 72、92、136 m。依据文献[12]，入口段亮度折减系数 k 取 0.035，山岭公路隧道洞口的洞外亮度 $L_{20}(S)$ 的实测值普遍在 2 300~3 300 cd/m^2 之间，端墙式洞门隧道通常在 3 000 cd/m^2 左右，本文中 $L_{20}(S)$ 取 3 000 cd/m^2 。依据公式(3)及文献[12]，得隧道入口段 TH1、TH2 亮度要求值分别为 105、42.75 cd/m^2 ，过渡段 TR1、TR2、TR3 亮度要求值分别为 18.03、10.61、4.64 cd/m^2 。隧道路面材料为水泥混凝土，平均亮度和平均照度的换算关系取为 0.1 $\text{lx}/\text{cdm}^{-2}$ ，则 TH1、TH2、TR1、TR2、TR3 的照度分别为： $E_1=1 050 \text{ lx}$ ， $E_2=427.5 \text{ lx}$ ， $E_3=180.3 \text{ lx}$ ， $E_4=106.1 \text{ lx}$ ， $E_5=46.4 \text{ lx}$ 。为了保证隧道中车辆能安全通过，本文灯具安装高度 h 的取值范围设为 5~7 m。

3.2 灯具选择

选用雷士照明 LED 灯系列，灯具编号为 NHLED101~NHLED103，该类型灯具发光效率为 100 lm/W ，发光角度为 120° ，光线输出率 $\eta_0=1$ ，在 C0/180 面内的发光角度为 120° ，在 C90/270 面内的发光角度为 120° ，LED 灯具的养护系数 M 取 0.7。LED 灯具利用系数 η 可达到 0.8~0.913^[14-15]，这里取 η 为 0.85。

3.3 优化结果与分析

参照隧道实际布灯情况，TH1、TH2 和 TR1 三个照明段的纵向布灯间距取定值 2 m，TR2、TR3 二个照明段的纵向布灯间距取定值 4 m。将上述已知参数分别代进入口段和过渡段的优化模型中，通过遗传算法求出入口段 TH1、TH2，过渡段 TR1、TR2、TR3 的优化布灯参数，如表 1 所示。

根据文献[16]，该隧道原布灯方案为：入口段每隔 2 m 对称布置 400 W 的高压钠灯，过渡段 1 每隔 2 m 对称布置 250 W 的高压钠灯，过渡段 2 每隔 2 m 对称布置 150 W 的高压钠灯。改造后的布灯方案为：入口段每隔 2 m 对称布置 200 W 的电磁感应灯，同时每间隔一盏灯增加一盏 200 W 的电磁感应灯，以增加入口段的亮度；过渡段 1 每隔 2 m 对称布置 200 W 的电磁感应灯，过渡段 2 每隔 2 m 对称布置 120 W 的电磁感应灯。原布灯方案和改造后布灯方案的洞外亮度 $L_{20}(S)$ 取值均为 3 000 cd/m^2 。在相同的控制模式下，通过比

较电磁感应灯和 LED 灯的总功率来近似反映 LED 灯相比于电磁感应灯的节能效果。将优化得到的灯具功率向上取整,将入口段、过渡段改造后的布灯方案和优化布灯方案的布灯数据分别列于表 2 和表 3,同时列出优化布灯方案相比于改造后布灯方案减少的总功率。

表 1 布灯参数优化结果
Tab.1 Optimized results of luminaire-distribution parameters

参数	s/m	h/m	$\xi/(\circ)$	p/W	d_l/m	n
入口段 TH1	2	5.48	14.9	197	4.45	42
入口段 TH2	2	5.48	17.8	79	4.45	44
过渡段 TR1	2	5.48	10.3	37	4.45	72
过渡段 TR2	4	5.48	9.2	40	4.45	46
过渡段 TR3	4	5.48	19.5	20	4.45	70

表 2 入口段布灯方案功耗比较
Tab.2 Comparison of power consumption of luminaire-distribution styles in the threshold zone

参数	灯具功率 /W	纵向间距 /m	灯具个数	灯具总功率 /W	装灯总功率减少量/W
LED 灯优化(TH1)	200	2	42	8 400	
LED 灯优化(TH2)	80	2	42	3 360	5 040
电磁感应灯	200	2	84	16 800	

表 3 过渡段布灯方案功耗比较
Tab.3 Comparison of power consumption of luminaire-distribution styles in the transition zone

参数	灯具功率 /W	纵向间距 /m	灯具个数	灯具总功率 /W	装灯总功率减少/W
LED 灯优化(TR1)	40	2	72	2 880	
LED 灯优化(TR2)	40	4	46	1 840	
LED 灯优化(TR3)	20	4	70	1 400	35 880
电磁感应灯	200,120	2	302	42 000	

隧道入口段和过渡段原布灯方案耗电量较大,使用电磁感应灯改造后,入口段和过渡段的装灯总功率分别减少 5.04 kW 和 35.88 kW。从文献[15]的表 4 可以看出,过渡段 2 的实测亮度(25.6 cd/m^2)远高于需求亮度(14 cd/m^2),说明该段改造后“过度照明”现象依然严重。可见,雁列山隧道的照明系统依然有巨大的节能空间。

3.4 优化结果的仿真验证

利用 DIALux 软件建立隧道仿真模型,按照优化结果设置布灯参数。导入雷士照明灯具插件,入口段和过渡段的各小段分别按照表 2 和表 3 中的功率进行布灯,得各段优化方案中使用的灯具在隧道路面产生的照度值,结果如表 4、表 5 所示。表中括号内的数据为灯具光衰 30%时的照度值。

表 4 入口段布灯参数优化后的照度仿真值
Tab.4 Simulation values of illuminance with optimized luminaire-distribution parameters in the threshold zone lx

参数	入口段 TH1	入口段 TH2
左车道路面平均照度	1 532.01 (1 072.41)	624.64 (437.25)
右车道路面平均照度	1 527.83 (1 069.48)	621.56 (435.09)
要求值	$\geq 1 050$	≥ 427.50

表5 过渡段布灯参数优化后的照度仿真值

Tab.5 Simulation values of illuminance with optimized luminaire-distribution parameters in the transition zone lx

参数	过渡段 TR1	过渡段 TR2	过渡段 TR3
左车道路面平均照度	284.82 (199.38)	155.20 (108.64)	69.06 (48.34)
右车道路面平均照度	283.21 (198.25)	153.37 (107.36)	68.09 (47.66)
要求值	≥ 180.31	≥ 106.13	≥ 46.41

从表4、表5可以看出,使用LED灯按照优化参数布灯后,在灯具使用的初期,路面照度值远远高于要求值,灯具光衰30%后,路面照度值依然满足照明要求。说明灯具使用的初期存在“过照明”现象,有一定的电能浪费,此时可以通过适当的智能调光来控制灯具的输出功率,在保证满足路面照明需求的前提下进一步实现节能。

此外,上述仿真出的照度值是在洞外亮度取值3000 cd/m²得出的,当洞外亮度增大时,可在入口段和过渡段相邻的两个灯具之间布设加强照明灯具来提高路面照度,以此来满足驾驶员的视觉亮度需求。

3.5 亮度适应曲线

根据文献[13],入口段TH1上亮度维持在 L_{TH1} ,使驾驶员适应从高亮度的洞外进入低亮度的隧道后的行驶,从TH2开始降低亮度,线性下降为 $0.4L_{TH1}$,然后进入过渡段渐变区,亮度按适应曲线 $L_{TR}=L_{TH}(1.9+t)^{-1.4}$ 逐渐降低,直到等于中间段的亮度 L_m 。根据文献[11]可知中间段亮度为3.5 cd/m²,转换照度为35 lx。如图3所示,按照本文优化布灯方案,拟合的优化亮度适应曲线与理论适应曲线很接近,说明优化方案的可行性,既能达到节能的目的,又能较好地满足驾驶员驶入隧道后的人眼暗适应需求。

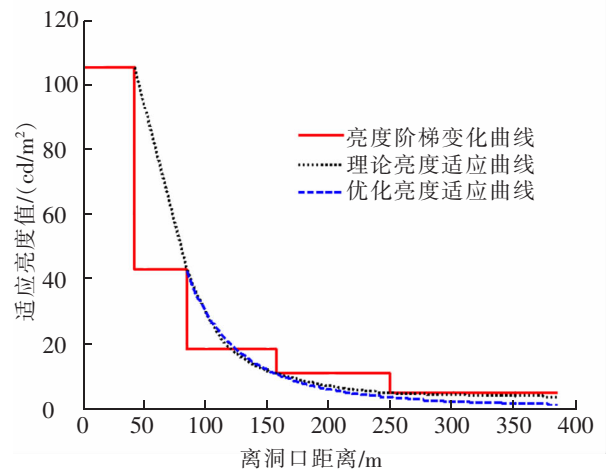


图3 亮度适应曲线图

Fig.3 Luminance adaptation curve of threshold and transition zone in the highway tunnel

4 结语

采用两侧对称布灯方式,以江西九景高速公路雁列山隧道为例,建立隧道入口段和过渡段布灯参数优化模型,得出该隧道入口段和过渡段灯具的最优布置参数,通过照明设计软件 Dialux,按照优化布灯参数进行仿真,得出的路面照度仿真值接近优化值,满足细则要求。采用LED隧道灯按照优化参数布灯时,装灯总功率比该隧道改造后的电磁感应灯布灯方案的装灯总功率减少40.92 kW(69.59%);最后,通过优化亮度适应曲线与理论亮度适应曲线的比较,验证了优化模型的正确性和优化布灯方案良好的节能性。

参考文献:

- [1] 肖志军,栾利强. 基于照度的高速公路隧道入口安全评价研究[J]. 交通科技,2015(6):72-74.
- [2] 高静,王瑜,姚殿梅. 隧道进出口过渡段长度与位置分布探析[J]. 西部交通科技,2011(6):31-34.
- [3] 谢培. 高速公路长隧道入口区段照明优化研究[D]. 西安:长安大学,2013.

- [4] 邱凡,马小军,刘乃涛,等. 隧道照明过渡段亮度动态需求探讨[J]. 照明工程学报,2010,21(6):13-18.
- [5] 王少博. 高速公路隧道入口段驾驶人视觉特征研究[J]. 汽车实用技术,2016(9):108-113.
- [6] 吴桂林,肖尧,梁波. 隧道入口段复合照明节能试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2017,13(3): 846-850.
- [7] 赵炜华,张冬梅,文英,等. 长隧道入口白天加强照明段长度优化[J]. 华北科技学院学报,2014,11(8):48-52.
- [8] 李靖,宋燕铭,刘雄. 隧道出入口延伸照明段落节能方法研究[J]. 公路工程,2012,37(2): 57-59.
- [9] 黄力彬. 上海长江隧道出入口加强照明 LED 改造的设计与实现[J]. 中国交通信息化,2016(5):125-128.
- [10] 杨超,李敏,杨晓霞,等. 高速公路隧道照明系统节能技术的发展[J]. 华东交通大学学报,2018,35(2):73-79.
- [11] YANG CHAO,FAN SHIJUAN. Parameters optimization and energy-saving of highway tunnel backlighting with LED[J]. Journal of Donghua University,2017,34(1):9-13.
- [12] 中华人民共和国交通运输部. JTG/T D70/2-01-2014 公路隧道照明设计细则[S]. 北京:人民交通出版社,2014.
- [13] CIE TECHNICAL REPORT. 88-2004. Guide for the lighting of road tunnels and underpass[S]. Vienna,Austria: CIE Central Bureau,2004.
- [14] 杨超,程翠. 公路隧道照明灯具利用系数研究[J]. 照明工程学报,2017,28(1):97-101.
- [15] SAGAWA K,TAKEICHI K. Mesopic spectral luminous efficiency function: final experimental report [J]. Journal of Light & Visual Environment,1987,11(1):22-29.
- [16] 陈文成,陈大华,陈育明,等. 电磁感应灯应用于雁列山隧道照明的探讨与实践[J]. 照明工程学报,2005,16(1): 51-55.

Study on Luminaire-Distribution Parameters Optimization for Threshold and Transition Zone Lighting of Highway Tunnel

Yang Chao, Xiao Yu

(School of Mechatronics and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: To obtain the optimal luminaire-distribution parameters (LDPs) of highway tunnel threshold and transition zone lighting system with symmetrical luminaire-distribution-style (LDS), a parameter optimization model (POM) of SLDS for tunnel threshold and transition zone was established, by taking illuminance of road surface meeting lighting requirement as constraint conditions, and taking minimum total power consumption of the lighting system as the objective function. In this paper, Yanlieshan tunnel of Jiuqing highway was taken as an example for the optimization. The optimal LDPs and the corresponding total power of the lighting system were obtained by the POM, and a comparison analysis between the optimization results and that of the real tunnel lighting system was performed. The research results show that the total power of the LED lighting system installed according to the optimized LDPs was less 69.59% than the total power of the transformed lighting system installed with electromagnetic induction lamps. A simulation experiment of the optimized LDPs of Yanlieshan tunnel lighting system was carried out by using Dialux software and the simulation results verified the correctness of the POM. The comparison between the optimized brightness adaptation curve and the theoretical brightness adaptation curve of the highway tunnel indicates that the optimized LDS can meet the visual adaptation requirement preferably.

Key words: luminaire-distribution parameters; optimization model; energy-saving; highway tunnel; threshold zone; transition zone