

文章编号: 1005-0523(2016)04-0067-06

公路隧道照明中央布灯参数优化研究

范士娟

(华东交通大学交通运输与物流学院, 江西 南昌 330013)

摘要:高速公路隧道照明系统的布灯参数决定着路面照度,影响着交通安全和照明能耗。为了得到高速公路隧道中间段中央布灯方式下最节能的布灯参数,以灯具安装高度、纵向安装间距和单灯功率为优化参数,以总功耗最小为目标,建立了隧道中间段中央布灯方式的参数优化模型。以九景高速公路雁列山隧道为例,通过优化模型得到该隧道中间段在中央布灯方式的优化布灯参数,并将优化结果与该隧道的布灯情况进行了比较。结果表明,基于优化布灯参数的LED灯照明系统,即使满负荷工作,比原高压钠灯照明系统节能超过51%,比改造后的电磁感应灯照明系统节能超过39%,节能效果显著;LED灯光衰30%以后路面照度及均匀度依然满足隧道照明要求。利用Dialux软件根据优化布灯参数建立了照明仿真系统并进行了仿真实验,仿真结果与优化计算结果基本一致,均满足隧道照明要求,证明了优化模型的正确性。

关键词:隧道照明;参数优化;中央布灯;节能

中图分类号:U453.7 **文献标志码:**A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.04.011

近几年,随着我国高速公路建设步伐的加快,高速公路隧道里程也不断增加。截至2015年底,我国高速公路隧道总长12 683.9 km,其中,长隧道和特长隧道共8 676.6 km^[1]。根据我国《公路隧道照明设计细则 JTGJ D70/2-01-2014》^[2],长度大于200 m的隧道和长度大于100 m的光学隧道均应设置照明。隧道照明系统是隧道运营中的高能耗系统^[3],是造成运营成本巨大的重要原因。重庆市公路隧道用电量统计表明,隧道每公里年电费为40余万元^[4];按此计算,2015年全国公路隧道年电费高达43亿元。如何在保证行车安全的同时降低电能消耗,已成为迫切需要解决的问题。采用节能灯具、优化布灯参数、对灯具实行智能控制等均可实现隧道照明节能。如在隧道中间照明段,60 W的LED灯能接近达到100 W的高压钠灯的照明效果^[5],在灯具布灯方案不变的情况下,仅更换隧道照明灯具就能节省电能约40%。近几年,大部分专家和学者对隧道照明的节能研究,主要集中在照明控制方面,而在布灯优化方面的研究相对较少。

Angel Pachamanov 针对隧道照明节能问题建立了优化模型,得出灯具功率固定时的最优布置参数^[6]。任神河对LED隧道灯的安装高度和角度进行了节能实验研究,得出了LED灯的最优安装方式^[7]。季佳俊仿真研究了LED灯与高压钠灯不同布灯形式、不同高度、不同间距对灯具利用系数、路面平均照度、路面照度总均匀度的影响规律^[8]。任神河和季佳俊都没有建立布灯参数优化模型。李宁以照明系统耗能最小作为目标函数,使各照明灯具照度分配达到最优,建立了基于遗传算法的隧道照明智能优化模型,并对其进行了仿真实验^[9]。常用的布灯方式有两侧对称布灯、两侧交错布灯、中央布灯、拱顶侧偏布灯(由中央布灯方式演变而来)和逆光布灯,尽管中央布灯方式存在维修不便的缺点,但其照明效果和节能效果均优于两侧布灯方式^[10]。拱顶侧偏布灯解决了中央布灯维修不便的缺点,但其照明效果和节能效果不如中央布灯,所以,中央布灯方式依然是一种不错的照明布灯方式。本文以灯具安装高度、纵向安装间距以及单灯功率为优化参数,以公路隧道中间段中央布灯方式的照明总功耗最小为目标,建立布灯参数优化模型,并在照明设计软件Dialux中对优化布灯方案进行仿真实验,以检验模型的正确性。

收稿日期:2016-03-23

基金项目:国家自然科学基金项目(61463015)

作者简介:范士娟(1969—),女,副教授,硕士,主要研究方向为隧道照明节能优化。

1 照明公式

1.1 照度

当灯具垂直照射路面时(如图1),单个灯具在路面 $b(x,y)$ 点产生的水平照度为

$$E_b = I_c(\gamma, \theta)h / (x^2 + y^2 + h^2)^{3/2} \quad (1)$$

式中: E_b 为单个灯具在路面点 b 处的水平照度, lx; h 为灯具中心至路面的垂直距离, m; γ 同为 b 点入射光线与灯具光轴线的夹角, rad; θ 为平面 AOy 和平面 AOb 的夹角, rad; $I_c(\gamma, \theta)$ 为灯具在 Ab 方向的光强, cd。

1.2 灯具发光强度

如果灯具的配光曲线图(表)已知,且考虑灯具的光衰和利用情况,则偏离灯具光轴线 γ 角处的实际光强 $I_c(\gamma, \theta)$ 按式(2)计算

$$I_c(\gamma, \theta) = I_{1000}(\gamma, \theta)\eta\eta_0M\Phi / 1000 \quad (2)$$

式中: $I_{1000}(\gamma, \theta)$ 为灯具配光曲线表中与 γ 和 θ 对应的光强, cd; η 为灯具的光线输出率; η_0 为灯具利用系数; M 为灯具养护系数; Φ 为灯具额定光通量, lm。

2 布灯参数优化模型

如图2,设 $A_1 \sim A_4$ 是隧道中间段相邻的4个灯具,以相邻的2个灯具 A_2 和 A_3 间的路面区域 $B_1 \sim B_4$ 为计算区域, A_1 和 A_4 为计算区域外相邻的2个灯具。这些灯具具有相同的型号,相同的功率 p , 相同的安装高度 h ; 纵向布灯间距为 s , 隧道内行车道路面宽度为 d_0 , 整个隧道的宽度为 d 。以路面纵向中心线为 X 轴, 以路面宽度方向为 Y 轴, 以隧道高度方向为 Z 轴, 计算区域的中心点为原点 O , 建立空间直角坐标系, 如图2所示。

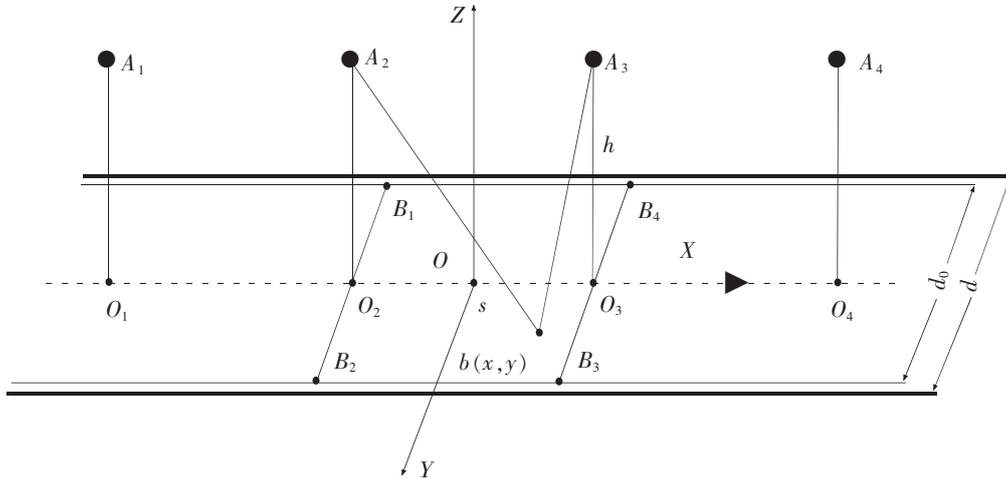


图2 隧道照明中央布灯示意图

Fig.2 Schematic diagram of tunnel central lamp distribution

计算区域内 $b(x,y)$ 点处的总水平照度为

$$E_b = E_{b1} + E_{b2} + E_{b3} + E_{b4} \quad (3)$$

式中: $E_{b1} \sim E_{b4}$ 分别为灯具 $A_1 \sim A_4$ 在计算区域 b 点产生的水平照度

$$E_{b1} = \frac{I_c(\gamma_1, \theta_1)h}{[(3s/2+x)^2 + y^2 + h^2]^{1.5}} \quad (4)$$

$$E_{b2} = \frac{I_c(\gamma_2, \theta_2)h}{[(s/2+x)^2+y^2+h^2]^{1.5}} \quad (5)$$

$$E_{b3} = \frac{I_c(\gamma_3, \theta_3)h}{[(s/2+x)^2+y^2+h^2]^{1.5}} \quad (6)$$

$$E_{b4} = \frac{I_c(\gamma_4, \theta_4)h}{[(3s/2+x)^2+y^2+h^2]^{1.5}} \quad (7)$$

式中: $\gamma_1 \sim \gamma_4$ 分别为灯具 $A_1 \sim A_4$ 到路面计算点 $b(x, y)$ 的光线与相应灯具光轴线的夹角; $\theta_1 \sim \theta_4$ 分别为灯具 $A_1 \sim A_4$ 到路面计算点 $b(x, y)$ 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。

依据文献[2],隧道中间段照明系统设计技术指标如下:

1) 照明灯具布置间距应满足频闪 $f \leq 2.5 \text{ Hz}$ 或 $f \geq 15 \text{ Hz}$ 的要求。频闪 $f = v/s$, 其中: v 为行车速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; 对于隧道中间段, 取 $f \leq 2.5 \text{ Hz}$ 。

2) 中间段路面亮度应不低于在设定的行车速度和交通流量下的规范最小值。

3) 路面亮度总均匀度和路面中线亮度纵向均匀度应不低于文献[2]所示规范值。

4) 隧道墙壁 2 m 以下的平均照度, 应不低于路面平均照度的 60%。

综上所述, 可以建立隧道中间段照明中央布灯参数优化模型为

$$\begin{aligned} \min P &= np = Lp/s \\ &\begin{cases} h - d[2 \tan(\beta)] \geq 2 \\ h_{\min} \leq h \leq h_{\max} \\ v/2.5 \leq s \leq 2h \tan(\alpha) \end{cases} \\ \text{s.t. } &\begin{cases} E_{\min} \geq \max(E_0, U_0 E_{\text{av}}) \\ E_{\min} \leq E_{\text{av}} \\ E_{c \min} \geq U_1 E_{c \max} \\ E_{c \min} \leq E_{c \max} \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: α, β 分别为灯具在 X 方向和 Y 方向发光角度的一半; h_{\min}, h_{\max} 分别为灯具安装高度的最小值和最大值; P 为 n 个灯具的总功率; L 为隧道中间段长度; E_{\min} 为隧道路面计算区域最小照度值; $E_{c \min}$ 为隧道路面中线最小照度值; $E_{c \max}$ 为隧道路面中线最大照度值; E_0 为满足交通要求的中间段最小照度值; U_0 为路面亮度总均匀度; U_1 为路面中线亮度纵向均匀度; E_{av} 为隧道路面计算区域的平均照度。

3 优化实例与仿真

3.1 优化对象

以江西九景高速公路雁列山隧道作为研究对象^[11-12], 该隧道为双洞单向交通设计, 由 1 号、2 号两座隧道构成, 全长 3 352 m, 其中 1 号隧道长 1 533 m, 2 号隧道长 1 819 m; 隧道路宽 10.25 m, 净高 7.425 m, 行车道宽 8.5 m, 设有人行检修道, 设计交通量 $\geq 1\,200 \text{ 辆} \cdot \text{h}^{-1}$, 设计车速 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。以 2 号隧道为例, 其隧道中间段长度约为 1 383 m。隧道中间段亮度要求值为 $3.5 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$, U_0 取 0.4, U_1 取 0.6; 路面铺设水泥混凝土, 照度和亮度的换算关系为 $10 \text{ lx} \cdot \text{cd}^{-1} \cdot \text{m}^2$, 满足交通要求的中间段最小照度值 E_0 为 35 lx。考虑灯具的安装、维护和车辆能正常通过, h_{\min} 取 5 m, h_{\max} 取 7 m。

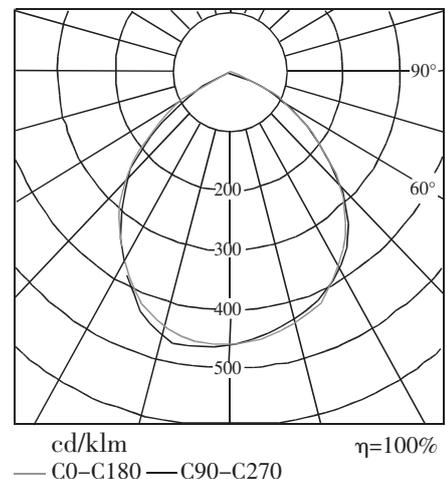


图 3 LED 灯配光曲线
Fig.3 Light distribution curve of LED lamp

3.2 灯具配光系数及光强

采用雷士照明 LED 灯系列,灯具型号为 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 $\eta=100\%$,其配光曲线如图 3 所示。从图 3 可以看出,灯具在 C0/180 和 C90/270 两个配光剖面的配光曲线很接近,为简化计算,将其处理为轴向对称的配光曲线。 M 取 0.7,LED 灯的 η_0 可达到 0.8~0.913^[13-14],这里取 η_0 为 0.85。

灯具的实际光强为

$$I_c(\gamma, \theta) = 46 \eta_0 \eta M p f(\gamma) \quad (9)$$

式中: $f(\gamma)$ 为根据 LED 灯光强表, $\gamma=0\sim\pi/2$ 的光强值 $I_{1000}(\gamma, \theta)$ 拟合得到的配光系数, $\text{cd}\cdot\text{lm}^{-1}$ 。

$$f(\gamma) = 0.999 e^{-\left(\frac{\gamma-0.06845}{0.6399}\right)^2} + 0.3048 e^{-\left(\frac{\gamma-0.71875}{0.3406}\right)^2} \quad (10)$$

3.3 优化结果与分析

将隧道已知参数代入优化模型式(8)中,得 LED 灯的优化布置参数,如表 1 所示。

表 2 列出了该隧道优化后的布灯参数及总功率、采用 60 W 的 LED 灯代替 100 W 的高压钠

灯的布灯参数及总功率、改造后的布灯参数及总功率和原布灯参数及总功率,以及节电率。从表 2 可以看出,原布灯方案耗电量最大,使用 80 W 的电磁感应灯替换 100 W 的高压钠灯可节省电能 20%,使用 60 W 的 LED 灯替换高压钠灯可节省电能 40%,使用 107 W 的 LED 灯按照优化参数布灯,即使满负荷工作,也比使用高压钠灯的原布灯方案节省电能 51%以上,比使用电磁感应灯的改造方案节省电能 39%以上,比使用 60 W 的 LED 灯替换高压钠灯的照明方案节省电能 19%以上。优化后的布灯方案节能效果显著。

表 1 中央布灯参数优化结果

Tab.1 Optimized results of central lamp distribution

参数	s/m	h/m	p/W	P/kW
优化结果	8.89	7	107	16.692

表 2 4 种布灯方案的总功耗比较

Tab.2 Comparison of total power consumption of four lamp distribution styles

方案	灯具布置方式	灯具功率 /W	纵向间距 /m	灯具个数	灯具总功率 /kW	节电率 /%
LED 灯优化模型	中央布灯	107	8.89	156	16.692	51.8
LED 灯替换高压钠灯	两侧对称布灯	60	8	346	20.76	40
电磁感应灯 ^[15]	两侧对称布灯	80	8	346	27.68	20
高压钠灯(原方案)	两侧对称布灯	100	8	346	34.60	

3.4 优化结果的仿真实验

根据九景高速雁列山隧道的结构参数在 Dialux 软件里建立隧道仿真模型,并依据优化的布灯参数在其中建立照明系统。采用雷士照明 LED 灯,型号为 NVC NHLED102 120W/120°,灯具功率为 120 W,发光角度为 120°;灯具安装间距为 8.89 m,灯具安装高度为 7 m;计算区域在 X、Y 方向均 10 等分,得到 121 个计算点。仿真得到各计算点照度结果如表 3 所示。将表 3 中数据乘以(107/120)即可得到 107W LED 灯的仿真照度值和照度均匀度,结果如表 4 所示,括号内的数据为 LED 灯光衰 30%以后路面计算点的照度值。

从表 4 可以看出,使用 LED 灯按照优化参数布灯后,在 LED 灯光衰<30%前,隧道路面的照度和照度均匀度的优化计算值和仿真值均满足隧道照明要求;在 LED 灯光衰 30%后,只有路面最小照度(隧道墙壁侧的行车道边上)的仿真值略小于规范要求值和优化计算值,此时,最小照度仿真值与优化计算值、规范要求值的误差均小于 2%;其余仿真照度值均大于优化计算照度值,且都满足隧道照明要求。

误差产生的原因是: 灯具配光曲线是近似对称的,但在优化模型中处理成完全轴对称,优化计算时利用拟合的配光系数公式计算路面照度值,而仿真时路面照度值是利用灯具光强表直接计算的; 优化模型中没有考虑隧道墙壁对光线的反射,而在仿真模型里考虑了隧道墙壁对光线的反射,造成隧道路面的照度

表 3 隧道路面计算区域计算点的照度仿真值
Fig.3 Simulated illuminance values of the calculation points

Y/m	X/m										
	0.000	0.889	1.778	2.667	3.556	4.445	5.334	6.223	7.112	8.001	8.890
8.50	62	62	60	59	58	57	58	59	61	62	62
7.65	86	85	83	80	78	77	78	80	83	85	85
6.80	98	98	94	90	87	85	87	90	93	96	98
5.95	111	111	106	100	95	93	95	96	103	108	111
5.10	120	121	116	107	100	98	100	105	111	116	120
4.25	124	125	121	111	102	100	102	107	113	120	124
3.40	122	123	118	108	100	97	99	104	110	117	122
2.55	113	114	109	100	94	92	93	97	103	108	113
1.70	99	99	95	90	85	84	85	88	92	96	99
0.85	85	85	82	79	76	75	76	78	80	83	85
0.00	61	61	60	57	56	55	55	56	58	50	61

仿真值大于优化计算值。优化计算结果满足隧道照明要求,且与仿真结果基本一致,验证了布灯参数优化模型的正确性。

表 4 中央布灯参数优化后隧道路面的照度和照度均匀度
Tab.4 Illuminance and illuminance uniformity of the tunnel road surface with optimized CLDS parameters

参数计算	路面最小照度 / lx	路面中线最小照度 / lx	路面中线最大照度 / lx	路面平均照度 / lx	路面照度总均匀度	路面纵向照度均匀度
优化计算结果	50.01(35.01)	84.67(59.27)	101.5(71.06)	75.52(52.87)	0.66	0.83
仿真计算结果	49.04(34.33)	89.17(62.42)	110.6(77.40)	81.52(57.06)	0.60	0.81
规范要求值 ^[2]	≥35			≥35	≥0.4	≥0.6

4 结束语

建立了隧道中间段中央布灯参数优化模型,并以江西九景高速公路雁列山隧道为例,通过优化模型得到该隧道中间段采用 LED 灯的最优布灯参数。LED 灯光衰 30%时,优化计算的路面照度和照度均匀度均满足隧道照明要求;与原高压钠灯布灯方案、改造后的电磁感应灯布灯方案,以及用 60 W LED 灯代替 100 W 高压钠灯的布灯方案相比,即使优化布灯方案满负荷工作,节能效果也非常显著。

采用 Dialux 软件对优化布灯方案进行了仿真,仿真结果与优化计算结果基本一致,验证了布灯参数优化模型的正确性。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 2015 年交通运输行业发展统计公报[EB/OL]. <http://www.china-highway.com/news/2016/1017727.php>.
- [2] 中华人民共和国交通运输部. 公路隧道照明设计细则 JTGJ D70/2-01-2014[S]. 北京:人民交通出版社,2014.
- [3] 王少飞,涂耘,邓欣,等. 论公路隧道照明节能[J]. 照明工程学报,2012(3):106-112.
- [4] 史玲娜,涂耘,王小军. 新旧规范对比下的隧道照明节能设计研究[J]. 照明工程学报,2015(1):50-54.

- [5] 白欣欣. 高速公路长大隧道照明系统改进研究[D]. 西安:长安大学,2013.
- [6] ANGEL SCIENCE PACHAMANOV, Dessislava Pachamano. Optimization of the Light Distribution of Luminaries for Tunnel and Street Lighting[J]. Engineering Optimization, 2008(1):47-65.
- [7] 任神河, 韩凯旋. LED 隧道灯最优安装方式的实验研究[J]. 物联网技术, 2012(7):30-32.
- [8] 季佳俊. 三车道大断面公路隧道照明节能参数优化研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2012.
- [9] 李宁, 王晓东, 吴建德, 等. 遗传算法在高速公路隧道照明智能优化中的应用[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2013, 14(S1):342-345.
- [10] 王志伟. 公路隧道照明系统节能技术研究[D]. 南昌:华东交通大学,2010.
- [11] 何凌坚, 李世京. 九景公路雁列山隧道复合式衬砌防排水的设计与施工[J]. 探矿工程:岩土钻掘工程, 1999(6):41-43.
- [12] 吴洁珍. 雁列山隧道施工的质量控制[J]. 探矿工程:岩土钻掘工程, 2003(S1):295-298.
- [13] SAGAWA K, TAKEICHI K. Mesopic spectral luminous efficiency function; Final experimental report. I [J]. Light & Vis Env, 1987, 11(1):22-29.
- [14] 杨超, 王志伟. LED 在隧道照明工程中的应用研究[J]. 照明工程学报, 2011(2):60-66.
- [15] 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(1):51-55.

Study on Parameters Optimization of Highway Tunnel Central Lamp Distribution

Fan Shijuan

(School of Railway Tracks and Transportation, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Lamp-installation-parameters (LIPs) of highway tunnel lighting system determine illuminance of road surface and influence traffic safety and lighting power consumption. In order to acquire the most energy-saving LIPs of central lamp distribution (CLD) lighting system in highway tunnel interior zone, the parameters optimization model (POM) of CLD for tunnel interior zone was established, with lamp installation height, longitudinal installation spacing and lamp power as optimization parameters, and with minimum total power consumption of the CLD lighting system as objective function. Yanlieshan Tunnel of Jiuqing Highway was taken as the example for the optimization. The optimal LIPs of the CLD lighting system of the tunnel interior zone were obtained by the POM, and comparison between the optimization results and that of Yanlieshan Tunnel lighting system was performed, which showed that the optimized CLD lighting system with LED lamps installed based on the optimized LIPs could save more 51% electric energy than the original lighting system installed with high pressure sodium lamps and could save more 39% electric energy than the transformed lighting system installed with electromagnetic induction lamps even under full-capacity lighting condition, the energy-saving effect is remarkable. Illuminance and illuminance uniformity of the tunnel road surface still met the lighting demands even the LED lamp's luminance decreased 30%. A CLD lighting simulation experiment with the optimized CLD LIPs for Yanlieshan Tunnel was accomplished in the software Dialux, and the simulated results were obtained and met the lighting demands and basically agreed with the optimization calculation results, which proved the correctness of the CLD POM.

Key words: tunnel lighting; parameters optimization; central lamp distribution; energy-saving

(责任编辑 姜红贵)