

文章编号: 1005-0523(2017)02-0128-06

基于布灯参数优化的隧道照明节能控制

杨超, 程翠, 徐一航

(华东交通大学机电与车辆工程学院, 江西南昌 330013)

摘要: 为了保证在行车安全的前提下最大程度地降低隧道照明能耗, 提出了一种针对隧道中间段的照明节能控制系统。该系统以布灯参数优化后的照明系统为基础, 根据实际车速、车流量确定隧道最小需求亮度, 采用调光控制方法调节 LED 灯的功率, 实现照明节能。以雁列山隧道为例, 对参数优化后的中央布灯照明系统进行节能控制, 并与只进行优化的照明系统和该隧道实际改造后的照明系统进行比较, 结果表明, 实行调光控制的照明系统比只进行优化的照明系统至少节能 38.8%, 比实际改造后的电磁感应灯照明系统至少节能 63.1%, 节能效果非常显著。利用 Dialux 对实行调光控制的照明系统进行了仿真, 仿真结果表明, 不同车速、车流量条件下的隧道路面最小照度、路面照度总均匀度和路面纵向照度均匀度均满足交通要求。

关键词: 隧道照明; 节能控制; 参数优化; 仿真

中图分类号: U453.7

文献标志码: A

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2017.02.019

隧道照明是公路隧道运营安全的基本保障。根据我国《JTJG D70/2-01-2014 公路隧道照明设计细则》^[1], 长度大于 200 m 的隧道和长度大于 100 m 的光学长隧道均应安装照明设施, 以便行驶车辆能以设定的行车速度安全地通过隧道。隧道照明系统也是隧道运营中的高能耗系统^[2-4], 如何在确保行车安全的同时降低隧道照明能耗, 成为隧道设计、建设和运营单位亟需解决的问题^[5]。

国内外许多学者和研究人员在隧道照明节能方面进行了研究, 在一定程度上能达到节能的效果。黄传茂^[6]以照明系统功耗最小为目标, 分别建立了中央布灯、拱顶侧偏布灯、对称布灯、交错布灯和逆光照明共 5 种布灯方式的布灯参数优化模型, 通过仿真实验验证了模型的正确性和节能的有效性; 范士娟^[7]建立了隧道中间段中央布灯方式的参数优化模型, 通过该优化模型可得到最节能的布灯参数; 文献[6-7]都只是根据文献[1]规定的设计车速和车流量进行布灯参数优化, 实现了照明节能, 但当实际车速和车流量小于设计车速和车流量时, 就存在过照明现象, 从而造成电能浪费; 帖智武^[8]、冯岚^[9]通过控制技术对公路隧道照明系统实现节能, 但隧道照明控制系统分级程度低, 无法根据洞外亮度、车流量等变量的变化自适应调整隧道照明系统, 导致隧道各区段的照明灯具始终处于最大功率状态, 这种照明系统存在大量电能浪费问题; 于东东^[10]采用模糊神经网络控制算法, 根据隧道的车流量、车速以及洞外亮度动态调整隧道照明亮度, 实现了照明节能; 田军^[11]在模糊控制理论上设计了隧道照明主控制器, 用于接收隧道洞外亮度、车流量、车速等数据信息, 并通过控制算法处理, 输出符合实际需求的隧道照明调光控制命令, 从而实现照明节能; Lee, Choi^[12]利用模糊控制方法, 以隧道外部亮度、车速、交通量为输入参数, 提高了隧道照明系统能见度的同时实现了照明节能; Parise et al^[13]设计了一种隧道照明控制系统, 可根据隧道外部亮度、交通流量及气候条件自动调整照明系统的光通量, 改善了驾驶员的安全及舒适性, 避免过度照明; Zhang^[14]以环境信息、车辆信息和路面亮度为基础, 利用 PID 控制算法对隧道照明实现了智能控制。文献[8-14]都是通过控制技术实现隧道照明节能, 但没有进行布灯参数节能优化, 无法实现照明节能的最大化。本文将中间段中央布灯方式为例, 在布灯参数优化的基础上, 结合隧道照明无级调光控制, 研究隧道照明的节能性。

收稿日期: 2016-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(61463015)

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

1 隧道照明控制系统设计

1.1 隧道中间段照明要求

根据文献[1],隧道中间段所需最小亮度与车流量和车速的关系如表 1 所示。可以看到,如果隧道照明系统按照车速 80 km/h、车流量 $\geq 1\,200$ veh/h 设计,则当实际车速 < 80 km/h、车流量 $< 1\,200$ veh/h 时,路面实际所需亮度就会小于设计亮度,即所需灯具功率小于设计的灯具功率;如果仍然按照设计亮度进行照明,自然存在电能浪费。

表 1 中间段亮度
Tab.1 Interior zone luminance cd/m²

设计速度/ (km/h)	单向交通车流量/(veh/h)			双向交通车流量/(veh/h)		
	$\geq 1\,200$	350~1 200	≤ 350	≥ 650	180~650	≤ 180
120	10.0	6.0	4.5	10.0	6.0	4.5
100	6.5	4.5	3.0	6.5	4.5	3.0
80	3.5	2.5	1.5	3.5	2.5	1.5
60	2.5	1.5	1.0	2.5	1.5	1.0
20~40	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

注:① 当设计速度为 100 km/h 时,中间段亮度可按 80 km/h 对应亮度取值;

② 当设计速度为 120 km/h 时,中间段亮度可按 100 km/h 对应亮度取值;

③ 人与车混合通行的隧道,中间段亮度不应小于 2.0 cd/m²。

表 1 只给出了 3 个车流量范围内设定车速下的路面亮度要求值,当车速在相邻的两个设定车速之间时,如 $60 \text{ km/h} < V < 80 \text{ km/h}$,需要采取插值的方式来计算所需路面亮度值。采取线性插值的方式,设在某车流量 N 下,相邻的两个设定车速 V_1 和 V_2 对应的亮度分别为 L_1 和 L_2 ,则当车速 V 位于 V_1 和 V_2 之间时,隧道中间段的最小需求亮度按式(1)计算。

$$L_{\text{in}} = \begin{cases} (V - V_1)(L_2 - L_1)/(V_2 - V_1) + L_1, & V \geq 40 \\ L_0, & V < 40 \end{cases} \quad (1)$$

式中: L_0 为通隧道中间段的最小需求亮度,对于人与车混合通行的隧道, $L_0 = 2.0 \text{ cd/m}^2$,其余情况 $L_0 = 1.0 \text{ cd/m}^2$ 。

1.2 隧道照明调光控制方案

本文研究的是隧道中间段,灯具全天 24 h 开启。采用无级调光控制方式,运营中根据实测的路面最小照度值,调整灯具输出功率,使隧道内照度始终可以满足照明需求^[15]。为保证公路隧道行车安全性和舒适性,调控 LED 灯照明亮度时,控制系统采用亮度渐变的控制模式,分步、逐级达到目标亮度,以避免亮度瞬间变化产生不安全影响^[16]。

整个控制系统主要由车辆检测器、亮度检测器、照明控制计算机、中心控制器、调光控制器及 LED 灯组成,如图 1 所示。在布灯参数优化的基础上,隧道入口段布置的车辆检测器每隔一定时间统计/计算一次平均车速及车流量数据,并上传至照明控制计算机,控制计算机根据中间段的最小亮度需求模型计算出隧道洞内的需求亮度值;安装在隧道路面上最小亮度区域(同侧相邻两灯中间、隧道墙壁侧的行车道边^[7])的亮度检测器实时检测实际最小亮度,并上传至照明控制计算机;照明控制计算机根据隧道洞内的需求亮度值和

实际最小亮度,依据调光控制逻辑计算出当前统计间隔内所需的亮度调节值,向中心控制器发出调光控制指令;中心控制器将照明控制计算机发出的调光控制信号转换成隧道内灯具的亮度控制信号;调光控制器将灯具亮度控制信号转换成脉冲信号,通过 PWM 方式的占空比调节 LED 灯的电流,从而改变 LED 灯具的光通量(功率),使 LED 灯具的输出亮度达到隧道洞内实际的需求亮度,实现隧道的按需照明。

以隧道设计车速、车流量下照明灯具所需功率的 70% 作为灯具的初始功率进行控制。用 $P_{\min}$ 表示隧道照明最小需求亮度所需灯具功率, P_o 表示当前统计间隔内 LED 灯具的需求功率,用 P, P_r 分别表示下一统计间隔内 LED 灯具的需求功率和实际功率。为了避免下一统计间隔和当前统计间隔内平均车速、车流量变化较大造成路面亮度严重不足的情况,总是取当前统计间隔内 LED 灯具的需求功率作为下一统计间隔内 LED 灯具的初始功率,下一统计间隔内 LED 灯具的实际功率 P_r 根据其需求功率 P 按式(2)确定,但不能超过某车流量区间内车速 80 km/h 时 LED 灯具的需求功率。

$$P_r = \begin{cases} \max(1.05P_o, P_{\min}), & P_o \leq P \leq 1.05P_o \\ \max(P_o, P_{\min}), & 0.95P_o \leq P \leq P_o \\ \max(1.05P, P_{\min}), & P < 0.95P_o \text{ 或 } P > 1.05P_o \end{cases} \quad (2)$$

只要车流量在 3 个取值范围中的任何一个里,灯具功率的控制就只取决于车速;本文采取每隔 20 s 统计一次车流量和车速的方式来减小车流量和车速变化带来的影响。

2 算例分析

2.1 算例隧道及优化的布灯参数

以江西九景高速公路雁列山隧道作为研究对象^[17],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 $N \geq 1\,200$ veh/h,设计车速 80 km/h。以 2 号隧道为例,其隧道中间段长度约为 1 383 m;路面铺设水泥混凝土,平均亮度和平均照度的换算系数为 $10 \text{ lx} \cdot \text{cd}^{-1} \cdot \text{m}^2$ 。

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 $\eta=1$ 。该隧道优化的布灯间距 8.89 m,布灯高度 7 m,单灯功率 107 W,总功率 16 692 W。采用 107 W LED 灯的中央布灯优化方案,在不考虑光衰的情况下,即使满负荷工作,也比使用电磁感应灯的实际改造方案^[18]节能 39% 以上,布灯参数优化方案节能效果显著。但是,依然存在过照明的情况,原因如下:① 在设计车速(80 km/h)、车流量($\geq 1\,200$ veh/h)条件下,按照优化参数满负荷工作时,照明系统提供的路面最小照度(50 lx)大于路面需求的最小照度(35 lx),存在一定的电能浪费;② 当车速、车流量小于该隧道的设计车速、车流量时,照明系统提供的亮度(5 cd/m^2)大于所需的隧道亮度($< 3.5 \text{ cd/m}^2$),存在过照明和电能浪费。

2.2 隧道照明的调光控制及节能性分析

本文以布灯参数优化后的照明系统为基础,采用调光控制技术,根据隧道照明需求亮度调节 LED 灯的功率,实现按需照明。

表 2 中列出了不同车速、车流量下对布灯参数优化后的照明系统进行调光控制的单灯功率(圆整后)。

从表 2 可以看出,按照设计车速、车流量对布灯参数优化后进行布灯,在不实行调光控制的情况下,不

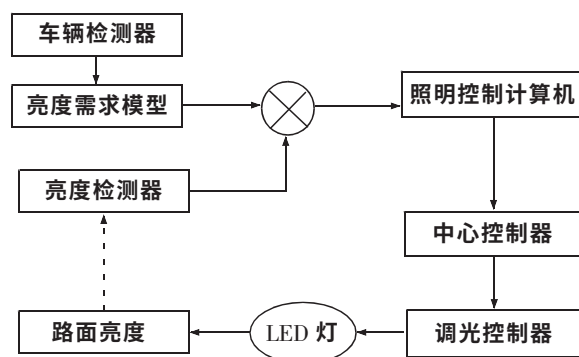


图 1 隧道照明系统控制方案

Fig.1 Control scheme of tunnel lighting system

考虑灯具光衰时,满足路面照度需求的灯具功率远小于优化功率 107 W,说明布灯参数优化后的照明系统依然存在巨大的节能空间。

表 2 不同车速、车流量下单灯功率
Tab.2 Power of single lamp under different vehicle speed and vehicle volume

车速/(km/h)	车流量/(veh/h)		
	$N \geq 1\ 200$	$350 < N < 1\ 200$	$N \leq 350$
80	66	47	28
70	59	40	24
60	49	29	20
50	35	24	20
40	20	20	20

图 2 所示为基于布灯参数优化的调光控制的照明系统总功率、布灯参数优化后的系统总功率及实际改造后的系统总功率随车速、车流量的变化曲线。可以看出,实际改造后的方案和布灯参数优化后的方案,都是按照设计车速、车流量进行布灯或优化布灯,不论车速、车流量怎么变化,所消耗的总功率始终是 27.68 kW 和 16.692 kW。在布灯参数优化的基础上对照明系统进行调光控制,根据车速、车流量的变化,自动调整 LED 灯的输出功率。在车速 80 km/h、车流量 $N \geq 1\ 200$ veh/h、 $350 \text{ veh/h} < N < 1\ 200 \text{ veh/h}$ 及 $N \leq 350 \text{ veh/h}$ 时,相对实际改造后的电磁感应灯方案可节能 63.1%,73.6%,84.2% 以上;相对布灯参数优化方案可节能 38.8%,56.3%,73.8% 以上。优化后的节能控制系统节能较显著。

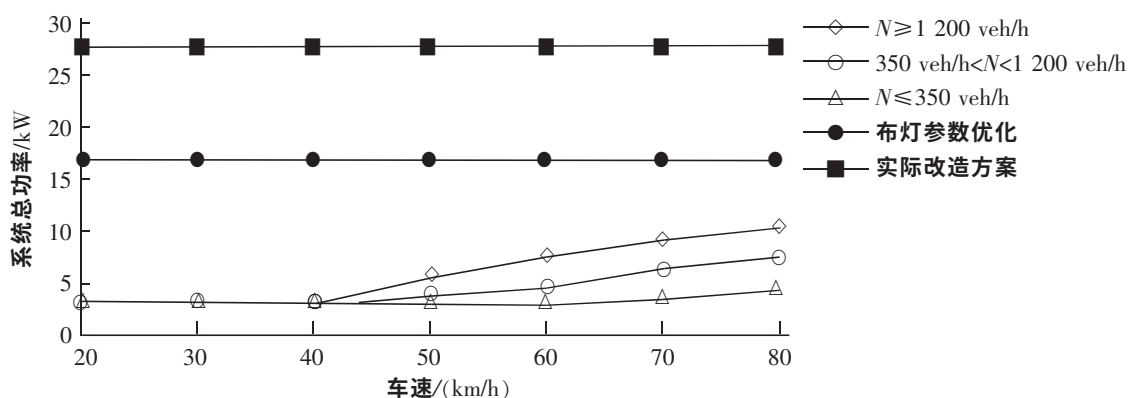


图 2 照明系统总功率曲线图
Fig.2 Graph of total power of lighting system

2.3 仿真验证

采用 Dialux 软件对优化后且无级调光控制的照明系统的照明效果进行仿真分析。根据文献[7]中的仿真条件及优化布灯参数在 Dialux 中建立隧道中间段的仿真模型,采用雷士照明中 NVC NHLED102 120 W/120° LED 灯,灯具功率为 120 W,发光角度为 120°。仿真得到计算区域各点照度的值后,可得到路面最小照度、中线最小照度和路面平均照度,将这些数据乘以(优化功率/120),即得到不同车速、车流量的优化功率的路面最小照度值、中线最小照度和路面平均照度,从而算得路面照度总均匀度和路面纵向照度均匀度,如表 3 所示。表 3 中括号里的数据为公路隧道照明设计细则规定值。

从表 3 可以看出,对布灯参数优化后的照明系统进行无级调光控制,隧道路面最小照度、路面照度总均匀度和路面纵向照度均匀度都满足照明要求,路面最小照度与公路隧道照明设计细则规定值很接近,误差很小,都在 3% 以内。

表 3 不同车速、车流量下最小照度和均匀度的仿真值和标准值

Tab. 3 Simulated and standard values of minimum illuminance and uniformity under different vehicle speeds and vehicle volume

速度/ (km/h)	$N \geq 1\ 200\ \text{veh/h}$			$350\ \text{veh/h} < N < 1\ 200\ \text{veh/h}$			$N \leq 350\ \text{veh/h}$		
	最小照度/ lx	路面照度 总均匀度	路面纵向 照度均匀度	最小照度/ lx	路面照度 总均匀度	路面纵向照 度均匀度	最小照度/ lx	路面照度 总均匀度	路面纵向照 度均匀度
80	35.64(35)	0.59(0.4)	0.84(0.6)	25.38(25)	0.59(0.35)	0.84(0.55)	15.12(15)	0.59(0.3)	0.84(0.5)
70	30.24(30)	0.59(0.4)	0.84(0.6)	20.52(20)	0.59(0.35)	0.84(0.55)	12.42(12.5)	0.59(0.3)	0.84(0.5)
60	25.38(25)	0.59(0.4)	0.84(0.6)	15.12(15)	0.59(0.35)	0.84(0.55)	10.26(10)	0.59(0.3)	0.84(0.5)
50	17.82(17.5)	0.59(0.4)	0.84(0.6)	12.42(12.5)	0.59(0.35)	0.84(0.55)	10.26(10)	0.59(0.3)	0.84(0.5)
≤ 40	10.26(10)	0.59(0.4)	0.84(0.6)	10.26(10)	0.59(0.35)	0.84(0.55)	10.26(10)	0.59(0.3)	0.84(0.5)

3 结束语

良好的隧道照明可以在耗电最少的情况下保证车辆安全通过隧道。本文根据公路隧道照明设计细则以车速、车流量为输入量,建立了隧道中间段最小需求亮度模型;以九景高速公路雁列山隧道为对象,以参数优化后的中央布灯照明系统为例,对照明系统进行调光节能控制,与优化后的照明系统(无调光控制)和该隧道实际改造后的电磁感应灯方案进行能耗比较,节能效果非常显著。采用 Dialux 软件对实施节能控制的照明系统进行了仿真,仿真结果表明,隧道路面最小照度、路面照度总均匀度及路面纵向照度均匀度都满足交通要求,证明了节能控制系统的正确性。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通运输部. JTGJ D70/2-01-2014 公路隧道照明设计细则[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2014.
- [2] 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.
- [3] 叶颖,王宝林,汤斌,等. 隧道照明节能技术方案设计及应用效益评价研究[J]. 照明工程学报,2013(9):246-248.
- [4] 唐春. 车辆感应式隧道照明控制系统研究[D]. 西安:长安大学,2012.
- [5] 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.
- [6] 黄凌茂. 高速公路隧道照明系统布灯参数优化研究[D]. 南昌:华东交通大学,2016.
- [7] 范士娟. 公路隧道照明中央布灯参数优化研究[J]. 华东交通大学学报,2016,33(4):67-73.
- [8] 帖智武. 公路隧道照明系统设计与管理改进建议[J]. 公路,2014(5):11-14.
- [9] 冯岚. 公路隧道照明节能技术研究[J]. 公路,2015(8):301-305.
- [10] 于东东. 基于 Zigbee 的智能 LED 隧道照明系统的设计[D]. 上海:东华大学,2015.
- [11] 田军. 公路隧道照明智能节能系统设计与研究[D]. 西安:长安大学,2015.
- [12] LEE J E, CHOI H K. Tunnel lighting control system using fuzzy reasoning[J]. Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers,2014,63(8):1140-1145.
- [13] PARISE G, MARTIRANO L, PARISE L. The energetic impact of the lighting system in the road tunnels[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2015,52(2):1-7.
- [14] ZHANG QIAN. The design of tunnel lighting intelligent control system[J]. Applied Mechanics & Materials,2015,734:984-993.
- [15] 田登. 公路隧道 LED 照明无级智能调光系统[J]. 中国交通信息化,2016(5):129-132.
- [16] 涂耘,史玲娜,王小军. 公路隧道按需照明节能运营控制技术应用[J]. 公路交通技术,2015(6):113-119.
- [17] 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.
- [18] 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.

Tunnel Lighting Energy-saving Control Based on Parameter Optimization of Luminaire Distribution

Yang Chao, Cheng Cui, Xu Yihang

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

Abstract: In order to reduce the energy consumption of tunnel lighting to the greatest degree on the premise of guaranteeing driving safety, a lighting energy-saving control system for the tunnel interior zone was proposed. Based on the optimized luminaire-installation-parameters (LIPs), the lighting system was controlled to realize the maximum energy-saving by using dimming method to adjust the power of LED lamps according to the minimum demand brightness determined by the actual vehicle speed and vehicle volume. By taking the tunnel-interior-zone lighting system of Yanlieshan tunnel as an example, the energy-saving control of the optimized central luminaire distribution lighting was carried out, and contrasting experiments were conducted between the LIPs optimized lighting system and the actual transformed lighting system with electromagnetic induction lamps (EILs). The results found that the dimming-controlled lighting system can save 38.8% more energy than the optimized lighting system without control, or save 63.1% more energy than the actual transformed lighting system with EILs, and the energy-saving effect was remarkable. The dimming-controlled lighting system based on the optimized LIPs was simulated with Dialux. The simulation results showed that the minimum illuminance, overall uniformity and longitudinal uniformity of the tunnel road surface illuminance meet the traffic demands of the tunnel lighting.

Key words: tunnel lighting; energy-saving control; parameter optimization; simulation

(责任编辑 刘棉玲)