

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.12.024

高速公路隧道照明节能模糊控制系统*

张伟刚¹ 瞿少成¹ 秦天柱¹ 黄芝龙¹ 刘高²

(1. 华中师范大学物理科学与技术学院 武汉 430079; 2. 广州小兵过河信息科技有限公司 广州 510000)

摘要:讨论了高速公路隧道照明节能模糊控制系统设计问题,设计了一种基于模糊控制的高速公路隧道照明节能系统。通过采集隧道外环境亮度与隧道车流量,基于模糊控制原理,一方面自适应调节隧道入口段与出口段亮度,以避免“黑洞效应”与“白洞效应”,另一方面在遵循高速公路隧道照明设计规范的基础上自适应调节隧道内各段亮度,以实现节能减排。经实际运行表明,高速公路隧道照明节能模糊控制系统满足高速公路隧道照明设计规范要求,运行稳定,与同期时段相比节能率在22%以上,具有推广价值。

关键词:隧道照明;模糊控制;节能系统

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8060

Energy saving fuzzy control system for expressway tunnel lighting

Zhang Weigang¹ Qu Shaocheng¹ Qin Tianzhu¹ Huang Zhilong¹ Liu Gao²

(1. Department of Electronics and Information Engineering, College of Physical Science and Technology, Central China Normal University, Wuhan 430079, China; 2. Guangzhou BingoTech Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract:The design of energy saving fuzzy control system for expressway tunnel lighting is discussed in this paper. Based on fuzzy control theory, an energy saving system for expressway tunnel lighting is designed. Firstly, the illumination intensity of the outside of expressway tunnel and the flow of tunnel traffic are measured on line. Then an adaptive control strategy is presented to adjust the lights in tunnel inlet and tunnel outlet, which can avoid “tunnel black hole effect” and “tunnel white hole effect”. Furthermore, a simple control method is proposed to adjust the lights inside tunnel. Finally, the practical running indicates that the proposed system meets the tunnel lighting design specification, and works stable. It can reduce 22% lighting energy compared with that of the same time interval, and has popularization value.

Keywords:tunnel lighting; fuzzy control; energy saving system

0 引言

近些年来,我国高速公路建设蓬勃发展,高速公路里程日益增多,给人们的交通出行带来了很大的便利。在高速公路运营成本中,高速公路隧道照明耗电占其较大部分,据悉,高速公路有80%的支出是用于电费,在这些电费中又有80%用于支付高速公路隧道中的照明用电。然而在高速公路的实际营运中,隧道照明用电的浪费十

分严重,大多数隧道照明系统都没有被合理、有效的控制,存在过度照明问题。因此,设计合适的高速公路隧道照明系统,既能避免隧道入口与出口处的“黑洞效应”与“白洞效应”,保障行车安全,又能实现节能减排,具有重要意义^[1]。

国外对隧道照明节能的研究开始时间相对较早,目前,国外隧道智能照明节能控制技术发展迅速,各种准则与规范的制订保障了行车安全^[2]与能源节约,但在智能交通、智能控制方面仍有待发展^[3]。我国在公路隧道照

收稿日期:2017-04 Received Date: 2017-04

* 基金项目:国家自然科学基金(61673190/F030101)、中央高校探索创新项目(CCNU15A02060)、广东省顺德区产学研项目(2015-6)资助

明技术方面的研究时间相对较短,目前已研究出适合本国国情的照明设计准则,但缺少对隧道内的照明进行精细化控制以及智能控制^[4-5],在低能耗、绿色交通方面仍有待发展。

本文通过实时采集隧道内外光照度、车流量及电能数据;运用模糊控制理论,基于国家标准《公路隧道照明设计细则》与实际运营经验,制定了模糊控制规则,设计并实现了一种隧道照明节能模糊控制系统,实现了“车流量大多开灯、车流量少少开灯”、“隧道外光照度强多开灯、隧道外光照度弱少开灯”的自适应模糊控制策略^[6]。经过实际运行与和能耗分析,本文设计的隧道照明节能模糊控制系统既能满足高速公路隧道照明需求,避免“黑洞效应”与“白洞效应”,同时有效地降低了隧道照明能耗。

1 高速公路隧道照明节能系统总体设计

依据《公路隧道照明设计细则》,长于 100 m 的高速公路隧道依据照明停车视距、隧道洞口中净空高度与长度分为入口段、过渡段、中间段与出口段等^[7],不同段有不同照明要求,隧道分段如图 1 所示。

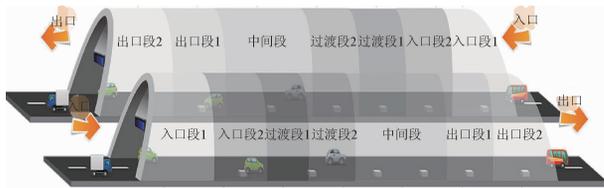


图 1 隧道分段
Fig. 1 Tunnel segment

为使驾驶员逐渐适应隧道内的环境,为避免“黑洞效应”与“白洞效应”,要求设计基于隧道外亮度的照明亮度增减梯度,如表 1 所示,其中, k 为亮度折减系数, $L_{20}(S)$ 代表隧道外环境亮度。

表 1 隧道照明亮度规范
Table 1 Tunnel lighting specification

隧道分段	隧道照明标准	固定照明亮度($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)
入口段 1	$L_{th1} = k \times L_{20}(S)$	122.5
入口段 2	$L_{th2} = 0.5 \times k \times L_{20}(S)$	61.3
过渡段 1	$L_{tr1} = 0.15 \times L_{th1}$	18.4
过渡段 2	$L_{tr2} = 0.05 \times L_{th1}$	6.1
中间段	$L_{in} = 4.5 \text{ cd/m}^2$	4.5
出口段 1	$L_{ex1} = 3 \times L_{in}$	13.5
出口段 2	$L_{ex2} = 5 \times L_{in}$	22.5

为此,本文设计的高速公路隧道照明模糊控制系统框图如图 2 所示,其主要功能如下:

1) 数据采集系统包括光照度采集系统^[8]、车流量采集系统与电能数据采集系统,分别采集光照度、车流量与用电量。为基于模糊控制的隧道照明控制算法提供数据基础。

2) 嵌入式控制系统控制数据采集系统,以获取光照度、用电量及监测车流量等,再上传数据于远程服务器,使数据被服务器存储。

3) 模糊控制算法实施隧道照明系统的模糊自适应控制。算法基于实时光照度与车流量,实时控制隧道内各段的亮度,以达到节能的目的。

4) 数据展示平台用于数据管理与展示等^[9],可直观展示算法控制效果。

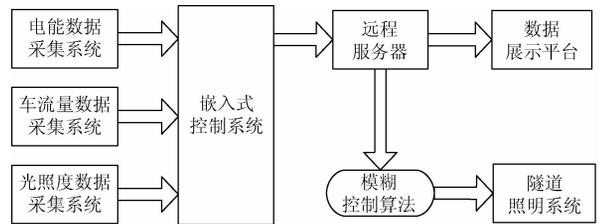


图 2 高速公路隧道照明节能系统结构
Fig. 2 Energy saving system structure of expressway tunnel lighting

隧道照明节能模糊控制系统的物联网拓扑如图 3 所示。利用运营商网络基于嵌入式 ARM 上传光照、车流及电能数据于服务器,并对数据的管理与展示,且利用模糊控制算法推导隧道内各段的最佳亮度,以达到安全行车与节能的目的。

2 高速公路隧道照明模糊控制算法设计

《公路隧道照明设计细则》尽管规范了隧道在入口段、过渡段、出口段与隧道亮度的折减系数等信息,但缺乏严格定义。实际操作中往往基于设计与施工现场经验而定,如广西地区某隧道亮度折减系数 k 值通常取 0.035, $L_{20}(S)$ 通常取 3 500 cd/m^2 。

在原隧道明控制系统中,通常依据表 1 计算出的固定照明亮度与当天早晨的天气,对隧道内各段照明进行控制,使隧道内各段亮度在白天保持固定。但根据实际情况,隧道外亮度 $L_{20}(S)$ 在 1 d 时间是不固定的,且大部分时间低于 3 500 cd/m^2 ,因此,原隧道明控制系统会造成过度照明。此外,隧道入口段、过渡段、出口段的定义采用原系统制定方案执行。

通常,隧道照明分普通 LED 基本照明灯与加强照明钠灯,且考虑到钠灯开启时间及使用年限等特性,隧道加强照明的钠灯通常不宜频繁的开启与关闭。因此,基于光照强度、车流量实时检测的柔性模糊控制就非常适

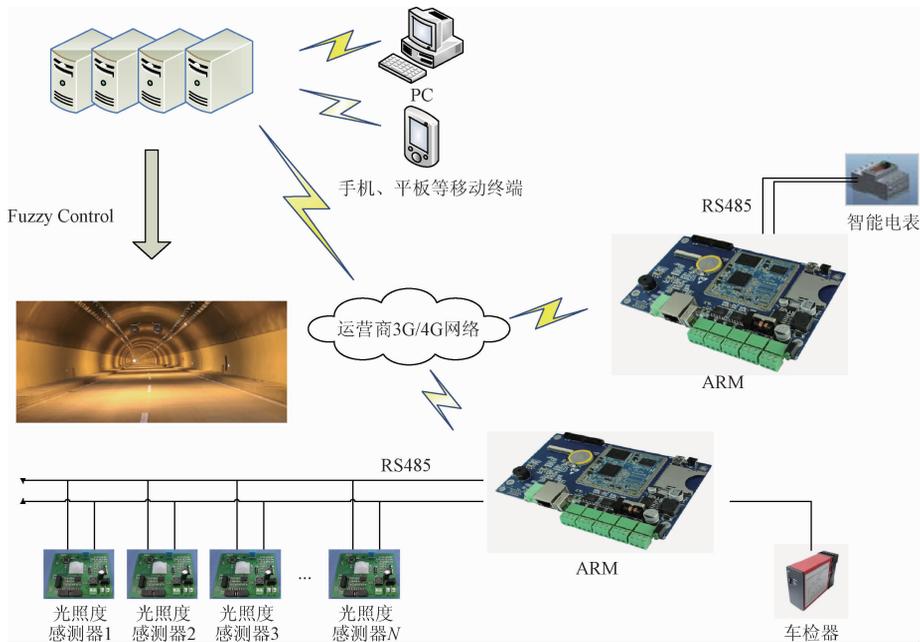


图 3 高速公路隧道照明节能系统拓扑图

Fig. 3 Energy saving system topology of highway tunnel lighting

合^[10]。本系统中,在隧道入口段、出口段与过渡段采用基于光照强度、车流量实时检测的柔性模糊控制^[11];在过渡段,基本 LED 照明灯随实时车流量采用自适应模糊控制^[12]。

2.1 隧道入口段、出口段与过渡段的模糊控制

在入口段、出口段和过渡段,模糊控制输入为外界亮度 $L(t)$ 与车流量 $V(t)$,模糊输出为隧道内亮度 $Y(t)$ 。其中,控制输入亮度 $L(t)$ 、车流量 $V(t)$ 分别划分为 5 个论域^[13],如表 2 所示。

表 2 模糊状态数字化
Table 2 Fuzzy state digitization

亮度 $L(t)$	车流量 $V(t)$	数字
很强	很大	2
较强	较大	1
一般	一般	0
较暗	较小	-1
很暗	很小	-2

由于室外环境亮度与车流量在决定隧道内亮度时候所占的比重不同,基于人工经验,选择了模糊修正因子^[14] $\alpha = 0.1$,因此,模糊控制的输入输出关系可以表示为:

$$Y(t) = (1 - \alpha)L(t) + \alpha V(t) \tag{1}$$

当 $\alpha = 0.1$ 所生成的模糊控制表如表 3 所示。表中输出越大,需要的最佳光照越强,则需要开启的灯具数量就要越多,以满足照明的需求。

表 3 隧道照明节能系统模糊控制规则表

Table 3 Fuzzy control rule of tunnel lighting energy saving system

$V(t)$	$Y(t)$				
	2	1	0	-1	-2
2	2	2	2	2	2
1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0
-1	-1	-1	-1	-1	-1
-2	-2	-2	-2	-2	-2

依据隧道的实际情况,在隧道建设时期已经依照 $3\ 500\ \text{cd}/\text{m}^2$ 的标准在隧道内部署了灯具,即当隧道内各段的灯具完全开启时,满足隧道外亮度为 $3\ 500\ \text{cd}/\text{m}^2$ 的照明需求。故本控制算法设定 $3\ 500\ \text{cd}/\text{m}^2$ 为模糊控制的分档阈值。

由表 3 可知,隧道外亮度直接决定隧道内的亮度,车流量对其基本无影响,故基于模糊控制对隧道外亮度进行分档,设计隧道外亮度与隧道内灯具(加强照明)的开关个数的对应关系,如表 4 所示。当室外亮度超过 $3\ 500\ \text{cd}/\text{m}^2$ 的 $3/4$ (即 $2\ 625\ \text{cd}/\text{m}^2$) 时,隧道内照明全开,即隧道内的亮度达到表 1 第 3 列的值;同理,当隧道外亮度在区间 $1\ 750 \sim 2\ 625\ \text{cd}/\text{m}^2$ 时,隧道内照明开 $3/4$,即整条隧道的加强照明灯具每 4 台灯开启 3 台,有 1 台是关闭的,使得隧道内的亮度为表 1 第 3 列值的 $3/4$ 。其余情况以此类推。

表 4 基于模糊控制的隧道照明分档控制表

Table 4 Tunnel segment lighting control based on fuzzy control

隧道外亮度/($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)	隧道内灯具开关数量
(3 500, +∞)	全开
(2 625, 3 500]	全开
(1 750, 2 625]	开 3/4
(875, 1 750]	开 1/2
(114, 875]	开 1/4
(0, 114]	全关

2.2 隧道中间段的模糊控制

依据隧道实际情况,中间段的照明仅存在基于 LED 灯的基本照明,故通过对 LED 基本照明灯进行调压,使得中间段亮度需随车流量的变化而变化^[15]。

在此段,其模糊控制输入为车流量 $V(t)$,模糊输出为适宜亮度 $Y(t)$ 。车流量 $V(t)$ 划分为 5 个论域,输出适宜亮度 $Y(t)$ 模糊化为 3 类,其模糊控制如表 5 所示,其分档控制规则如表 6 所示。

表 5 中间段照明节能系统模糊控制规则表

Table 5 Fuzzy control rule for lighting energy saving system of middle section

车流量 $V(t)$	最佳亮度 $Y(t)$
很大	较强
较大	较强
一般	一般
较小	较暗
很小	较暗

表 6 中间段照明节能系统分档控制规则表

Table 6 Segment control rule for lighting energy saving system of middle section

小时交通量/($\text{veh} \cdot (\text{h} \cdot \text{ln})^{-1}$)	中间段最佳亮度($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)
[1 200, +∞)	6.5
(350, 1 200)	4.5
(0, 350]	3.0

3 隧道照明节能系统能耗分析

本文设计的控制系统于 2015 年 11 月在广西某隧道中进行测试与实施。11 月 1 日~11 月 9 日采用基于模糊控制算法对隧道进行控制;而 11 月 10 日~11 月 12 日按原先照明控制进行照明。

3.1 隧道入口段 1 光照强度对比分析

本文选择 11 月 9 日和 11 月 11 日工况进行对比分析,11 月 9 号隧道外与入口段 1 亮度曲线如图 4 所示,11 月 11 日隧道外与入口段 1 亮度曲线如图 5 所示。

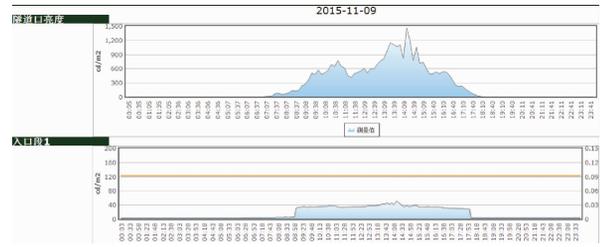


图 4 11 月 9 日隧道亮度曲线

Fig. 4 Tunnel luminance curve in November 9th

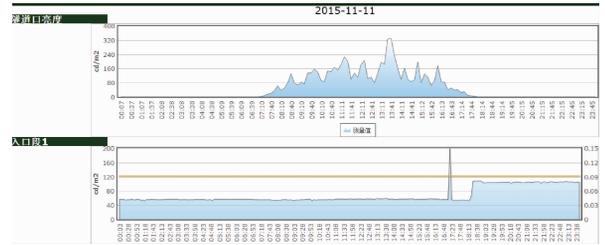


图 5 11 月 11 日隧道亮度曲线

Fig. 5 Tunnel luminance curve in November 11th

由图 4 可知,11 月 9 日隧道外亮度大多低于表 4 中的 875 cd/m^2 ,滤除部分毛刺,当天的室外亮度属于(114, 875],而在早晨 8 点 30 前和下午 18 点后,隧道口亮度都低于了 114 cd/m^2 ,故依据表 4 对隧道入口段 1 照明进行控制:在 0 点至早晨 8 点半,入口段 1 加强照明全关;8 点半到下午 18 点,只开 1/4 的加强照明;18 点后加强照明又全关。如图 4 下半部分所示,是控制后入口段 1 的亮度曲线。由图 4 可知,模糊控制是有效的。

由图 5 下半部分可知,11 日采用按原照明方式对隧道内照明进行控制:0 点至 18 点 30 分开 1/2 的灯具;晚上灯具全开。但由图 5 可知,当日隧道外亮度最高峰还未到 350 cd/m^2 ,白天大部分时刻的亮度属于(114, 875]。故原照明方式造成了过度照明。

3.2 隧道入口段 2 光照强度对比分析

依据 3.1 节对 9 号和 11 号隧道外亮度曲线的描述,分析隧道入口段 2 的亮度曲线。11 月 9 日隧道入口段 2 的亮度曲线如图 6 所示;11 月 11 日隧道入口段 2 的亮度曲线如图 7 所示。

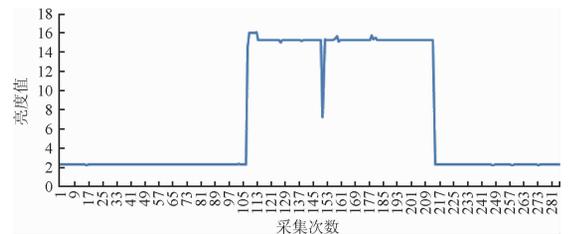


图 6 11 月 9 日隧道入口段 2 的亮度曲线

Fig. 6 Luminance curve of tunnel inlet section 2 in November 9th

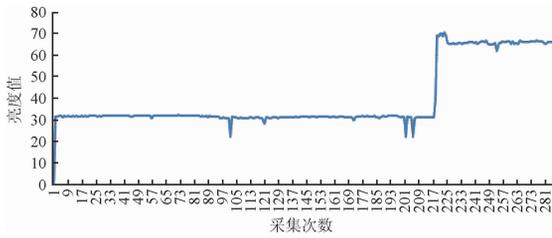


图7 11月11日隧道入口段2的亮度曲线

Fig.7 Luminance curve of tunnel inlet section 2 in November 11th

11月9日依据表4对隧道入口段2亮度进行控制,在0点至早晨8点半,入口段2加强照明全关;8点半到下午18点,只开1/4的加强照明;18点后加强照明又全关。入口段2加强照明全关时候的亮度值约为 2 cd/m^2 ,8点半到下午18点时,入口段2的亮度为表1中入口段2对应的固定照明亮度的1/4,约为 15 cd/m^2 。由图6可知,模糊控制是有效的。

图7所示的曲线形状与图5的下半部分类似,对比图7与图5中隧道外亮度曲线可知,按原照明控制方式对隧道内照明进行控制,产生了过度照明。

3.3 隧道过渡段光照强度对比分析

11月9日过渡段1和过渡段2的亮度曲线如图8所示;11月11日过渡段1和过渡段2的亮度曲线如图9所示。

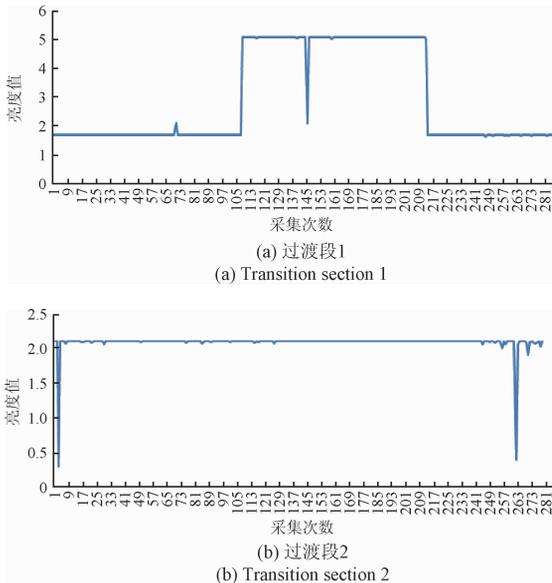
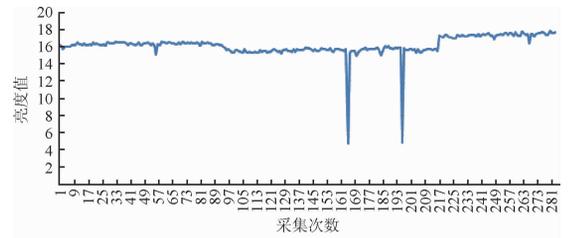


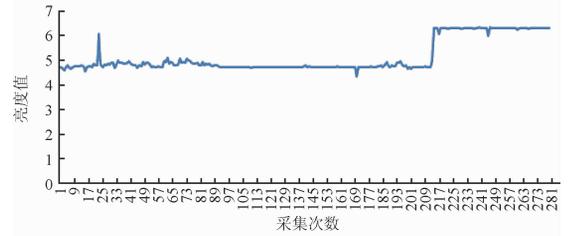
图8 11月9日隧道过渡段1,2的亮度曲线

Fig.8 Luminance curve of tunnel transition section 1, 2 in November 9th

由3.1节及3.2节的分析可知,11月9日在采用了基于模糊控制算法对隧道进行控制后,过渡段的加强照明应在8点半到下午18点间仅开表4中固定值的1/4,



(a) 过渡段1
(a) Transition section 1



(b) 过渡段2
(b) Transition section 2

图9 11月11日隧道过渡段1,2的亮度曲线

Fig.9 Luminance curve of tunnel transition section 1, 2 in November 11th

其余时间加强照明不开。如图8可知,对过渡段的模糊控制是有效的。

由图9可知,过渡段全天的亮度接近表1中的固定值,故原照明控制系统的控制方式不合理,造成了过度照明。

3.4 隧道出口段光照强度对比分析

11月9日出口段1和出口段2的亮度曲线如图10所示;11月11日出口段1和出口段2的亮度曲线如图11所示。

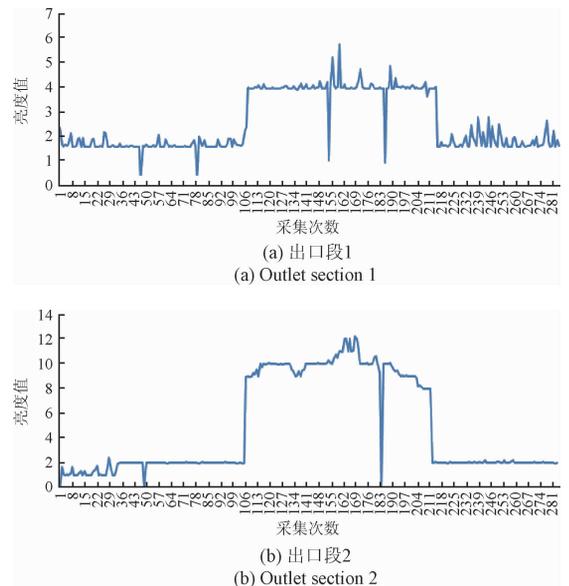


图10 11月9日隧道出口段1,2的亮度曲线

Fig.10 Luminance curve of tunnel outlet section 1, 2 in November 9th

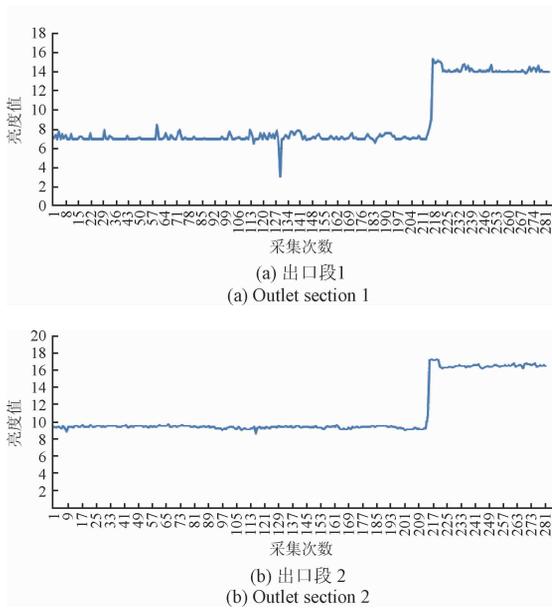


图 11 11 月 11 日隧道出口段 1、2 的亮度曲线
Fig. 11 Luminance curve of tunnel outlet section 1, 2 in November 11th

由图 10 可知,9 号出口段的亮度约为表 1 中固定亮度值的 1/4。出口段 2 由于接近于隧道外,会受洞外照入到隧道内光线的影响,故亮度会有所提升。由此表明,出口段的模糊控制是有效的。

由图 11 可知,原照明控制系统造成了过度照明。

3.5 整个系统能耗对比分析

广西某隧道照明系统 2015 年 11 月 1 日~11 月 12 日隧道各段及合计总用电量如图 12 所示。

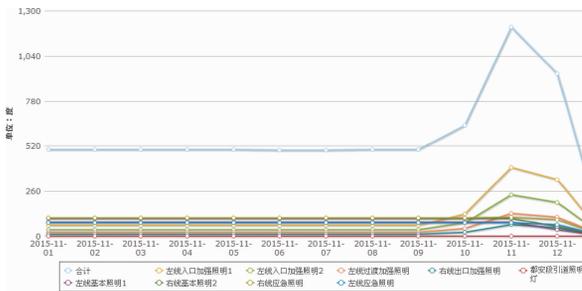


图 12 系统测试能耗曲线

Fig. 12 Curves of test energy consumption of system

图 12 中,最上面一条曲线为隧道总耗电量曲线,其余为各段耗电量。由图 12 可知,11 月 1 日~9 日基于控制策略的日隧道照明耗电量约为 500 kW·h,而在 10~12 日,在未使用节能系统控制的情况下耗电量有了大幅的增长,其中 10 日耗电量为 640 kW·h,11 日耗电量为 1 206 kW·h,12 日耗电量为 937 kW·h。由此可见,隧道照明节能系统的节能效果显著,11 月 10 日的节能率

约为 22%;11 月 11 日的节能率约为 59%;11 月 12 日的节能率约为 47%,日最高节能约 700 kW·h。以上分析表明,本文实施的模糊控制算法效果良好。

4 结 论

针对目前某高速公路隧道过度照明的问题,本文构建一种基于隧道照明节能模糊控制系统。通过实时采集隧道口照明度、车流量等数据,制定了隧道入口段、过渡段、出口段的照明模糊控制系统,实现了隧道内各段灯具的自适应模糊控制,避免了隧道口“黑洞效应”与“白洞效应”。通过实际运行与能耗对比分析,本文提出的隧道照明模糊控制系统有效地减小了能耗,具有推广价值。

参考文献

[1] PARISE G, MARTIRANO L, PARISE L. The energetic impact of the lighting system in the road tunnels [J]. IEEE/IAS Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference, 2015(2) :1-7.

[2] KITAMURA K, MIKI M, IKEGAMI H, et al. O-032 visualization of the realizable range of illuminance in an intelligent lighting system [J]. Journal of Medical Microbiology, 2013, 62(5) :663-676.

[3] HONG I, BYUN J, PARK S. Intelligent LED lighting system with route prediction algorithm for parking garage [J]. Xenotransplantation, 2012, 19(4) :233.

[4] ALIAKSEYEU D, MASON J, MEERBEEK B, et al. The role of ambient intelligence in future lighting systems [J]. Springer Berlin Heidelberg, 2011, 7040(3) :362-363.

[5] 何素梅,傅锦良,吴海彬. LED 隧道照明自动调光系统的设计 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(4) : 622-629.

HE S M, FU J L, WU H B. Design of automatic dimming system for tunnel LED lighting [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29 (4) : 622-629.

[6] ZHANG J, QIAO G F, SONG G M. Group decision making based autonomous control system for street lighting [J]. Measurement, 2013, 46(1) :108-111.

[7] 胡江碧,李然,马勇. 高速公路隧道入口段照明安全阈值评价方法 [J]. 中国公路学报, 2014, 27(3) :92-99.

HU J B, LI R, MA Y. Safety Threshold evaluation method for expressway tunnel lighting in entrance section [J]. China Journal of Highway and transport, 2014, 27(3) :92-99.

[8] 侯杏娜,陈寿宏,吕健富. 基于 NRF24L01 的隧道灯控系统设计 [J]. 国外电子测量技术, 2017(1) :

- 108-111.
- HOU X N, CHEN SH H, LV J F. Design of tunnel light control system based on NRF2401 [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2017(1):108-111.
- [9] 张伟刚,许天一,瞿少成,等. 基于物联网的高速公路隧道照明节能系统[J]. 电子测量技术, 2016, 39(10):104-107.
- ZHANG W G, XU T Y, QU SH CH, et al. Energy saving application of highway tunnel lighting system based on internet of things [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(10):104-107.
- [10] 吴常铖, 宋爱国, 章华涛. 一种肌电假手的自适应模糊控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(6): 1339-1345.
- WU CH CH, SONG AI G, ZHANG H T. Adaptive fuzzy control method for EMG prosthetic hand [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(6): 1339-1345.
- [11] LI Y, LING L, CHEN J. Combined grey prediction fuzzy control law with application to road tunnel ventilation system [J]. Journal of Applied Research & Technology, 2015, 13(2):313-320.
- [12] TANAKA K, SUGENO M. Stability analysis and design of fuzzy control systems [J]. IEEE International Conference on Networking, Sensing & Control, 2008, 45(2):135-156.
- [13] 任万杰, 于宏亮, 袁铸钢. 预测-模糊控制在联合粉磨系统中的应用[J]. 控制工程, 2015(S1):126-130.
- REN W J, YU H L, YUAN ZH G, Prediction-Application of fuzzy control for the cement combined gringing system [J]. Control Engineering of China, 2015(S1):126-130.
- [14] 彭鹏飞, 姜俊, 黄亮. 基于粒子群优化的潜器深度自适应模糊控制[J]. 控制工程, 2017, 24(2):441-445.
- PENG P F, JIANG J, HUANG L. The adaptive fuzzy control method for steady depth of underwater vehicle based on particles swarm optimization [J]. Control Engineering of China, 2017, 24(2):441-445.
- [15] BYUN J, HONG I, LEE B, et al. Intelligent household LED lighting system considering energy efficiency and user satisfaction [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2013, 59(1):70-76.

作者简介



张伟刚,1992年出生,华中师范大学硕士研究生,主要研究方向为智能控制与嵌入式技术。

E-mail:wg_zhang@mails.ccnu.edu.cn

Zhang Weigang was born in 1992, now he is a M. Sc. candidate of Central China Normal University. His main research interest is intelligent control and embedded technology.



瞿少成,1971年出生,博士,华中师范大学教授,博导,主要研究方向为智能信息处理与控制。

E-mail:qushaocheng@mail.ccnu.edu.cn

Qu Shaocheng was born in 1971, Ph. D., professor of Central China Normal University. His main research interest is intelligent information processing and control.