

文章编号 1004-924X(2015)09-2473-09

隧道照明闭环反馈智慧控制系统

秦 莉,董丽丽*,许文海,张 乾

(大连海事大学 信息科学技术学院,辽宁 大连 116026)

摘要:为了解决当前隧道照明中存在的耗电量大,照度测量繁杂,难以实时保证实际照明亮度等问题,设计了一种隧道照明闭环反馈智慧控制系统。该系统能够根据车辆有无、车辆行为信息和环境信息实时调整照明状态实现按需照明;采用摄像机图像亮度测量方法,通过图像灰度与亮度转换来实时获取隧道路面的亮度。为保证照明需求,系统采用PID闭环反馈调节方法,以照明所需亮度和实际测量亮度为基础,实时调节照明系统输出。实验证明,设计的系统安全可靠,自适应性强,具备实时亮度测量和闭环反馈调节功能;实现了按需照明,能保证实际照明亮度实时达到标准要求,同时最大限度地节能降耗;并能在保证行车安全的同时使人眼获得最佳的视觉感受。

关键词:隧道照明;PID闭环反馈;节能;亮度;智慧控制系统

中图分类号:U453.7 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152309.2473

Closed-loop feedback intelligent control system for tunnel lighting

QIN Li, DONG Li-li*, XU Wen-hai, ZHANG Qian

(College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

* Corresponding author, E-mail: dl_lili@163.com

Abstract: To solve the current problems in tunnel lighting, such as power consumption, illumination measuring complex, and difficult to ensure the actual luminance in real-time, a tunnel lighting closed-loop feedback intelligent control system is presented in this paper. The system realizes the lighting by need through adjusting lighting states based on the vehicle behavior information and environmental perception information collected by a sensor. It uses a camera image to measure luminance, and acquires pavement luminance in real-time through the transformation relationship between the image gray and pavement luminance. To meet the required luminance by lighting, the PID closed-loop feedback adjustment method is used to adjust the output of the lighting system in real-time and to ensure the actual luminance. The experiment shows that the designed system is secure and reliable and has higher adaptive ability. It is characterized by luminance measurement in real time, closed-loop feedback adjustment, lighting by need and can ensure the actual luminance to meet standard requirements. Meanwhile, it reduces energy consumption and offers an optimum visual experience for human eyes at safety driving vehicles.

Key words: tunnel lighting; PID closed-loop feedback; energy-saving; luminance; intelligent control system

收稿日期:2015-03-20;修订日期:2015-04-29.

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. 3132014301)

1 引言

隧道照明与普通道路照明有着很大的不同,主要体现在白天也要照明,而且白天照明比夜间照明更加复杂。汽车驾驶员在从白天明亮的环境接近、进入和通过隧道的过程中,会产生特殊的视觉问题。进入隧道前,由于隧道内外亮度差别极大,从隧道外部去看照明很不充分的隧道,入口处会看到一个黑洞^[1-3];汽车由明亮的外部进入隧道后,由于亮度的急剧变化,会出现视觉适应的滞后现象;而在隧道出口处会出现极强的眩光,产生一个很亮的洞口,此时驾驶员的可见度降低^[4-6]。因此,驾驶员的视觉适应性是隧道照明必须解决的问题。

解决该方法是根据隧道外部环境的亮度、车速、车流量等信息来保证隧道内部具有合适的亮度,而其前提是隧道灯具的功率能够满足亮度需求。隧道灯具每一时刻的亮度都是由隧道外部的亮度、车流量、车速信息,根据隧道照明规范计算的亮度值进行设定的,但亮度并不一定能达到实际需求^[7]。这是因为目前的隧道照明是每隔一段时间利用照度计进行点对点测量^[8]来获得隧道灯具的实际亮度信息,然而点对点测量亮度只能定时测量亮度,并不能满足实时测量的需求,即无法保证实际亮度与所需亮度的一致性。也就是说,只有实时监测灯具的亮度,才能解决由于灯具损坏和灯具光衰使实际亮度达不到设定值等问题。

本文设计了一种隧道照明闭环反馈智慧控制系统,实现了对隧道内部亮度的实时测量和控制。在隧道内由于发光二极管(LED)灯^[9]损坏或者灯具光衰导致隧道内部亮度值达不到《公路隧道照明设计细则 JTG/T D70/2—01—2014》(以下简称:照明明细)^[10]要求的情况下,本文以亮度实时监测摄像机采集的图像信息为基础计算洞内路面亮度的实际值,实时监测洞内照明亮度,以环境信息感知传感器和车辆信息感知传感器采集到的数据为基础,根据照明明细计算洞内各个段的设定亮度值。将设定亮度值和实际亮度值作为 PID 调节控制单元的输入参数,经过计算后会重新确定灯具的调节亮度值,根据公式将调节亮度值转换成调光指令,并通过调光控制器将调光指令转

换成对应的脉冲信号,通过脉宽调变(PWM)调光方式^[11-12]实时调整各个灯具的亮度,从而弥补了隧道内部实际亮度与需求亮度的差值。

2 隧道照明闭环反馈智慧控制系统组成

隧道照明闭环反馈智慧控制系统的结构示意图如图 1 所示。

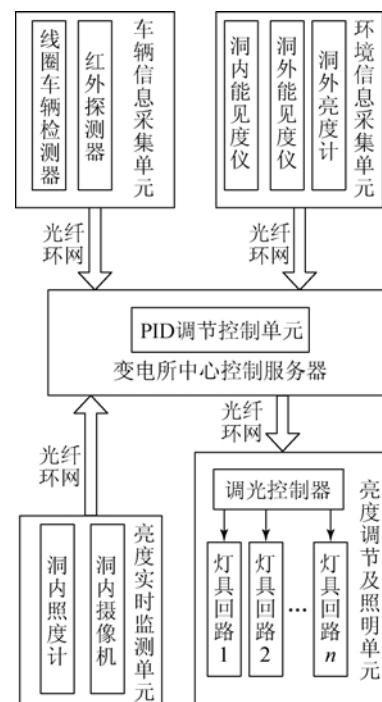


图 1 隧道照明智慧控制系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tunnel lighting intelligence control system

系统主要由车辆信息采集单元、环境信息采集单元、亮度实时监测单元、PID 调节控制单元、亮度调节及照明单元五个模块组成。车辆信息采集单元主要由红外探测器和车辆线圈检测器组成,负责采集车流量、车速、车辆有无等信息。环境信息采集单元主要由洞外亮度计、洞内外能见度仪组成,负责采集洞外亮度、洞内外能见度等信息。亮度实时监测单元主要由洞内照度计、洞内摄像机组成,负责实时获取隧道内部路面图像,基于图像灰度计算隧道内部各点的实际亮度值以及整个路面的亮度分布情况。PID 调节控制单元运行于变电所中心控制服务器内,以车辆信息和环

境信息采集单元采集的信息为基础,根据照明细则计算隧道各个路段的设定亮度值。实际亮度值由亮度实时监测单元计算获得,PID调节控制单元以设定亮度值和实际亮度值作为输入参数进行PID闭环反馈调节。变电所中心服务器将PID调节控制单元输出的调节亮度值转换成隧道内灯具的亮度控制等级信息,实时控制隧道内的调光控制器将灯具亮度等级指令信号转换成对应的脉冲信号,通过PWM调光方式调整隧道洞内多个灯具的输出亮度达到实际需求,并且在满足要求的情况下,尽可能地实现节能。

3 PID调节控制单元

PID调节控制单元是隧道照明闭环反馈智慧控制系统中最重要的组成部分,是保证隧道照明能够闭环反馈调节控制的关键。

3.1 亮度闭环反馈调节机理

图2是PID闭环反馈调节原理的示意图。根据照明细则,由洞外亮度计、洞内外能见度仪传来的环境信息和车辆检测传感器采集的信息计算设定亮度值。洞内照度计与洞内摄像机组成的亮度实时监测单元用于获得隧道内部的实际亮度,并将实际亮度值实时反馈给PID调光计算模块。PID调节控制单元以设定亮度值、亮度实时监测单元计算的实际亮度值作为输入参数,计算得到调节亮度值,将调节亮度值按照转换公式转换成亮度控制等级。LED调光控制器将灯具亮度控制等级转换成对应的脉冲信号,通过PWM调光方式调整隧道洞内多个灯具的输出亮度,使灯具的亮度输出值能够实时满足亮度需求。

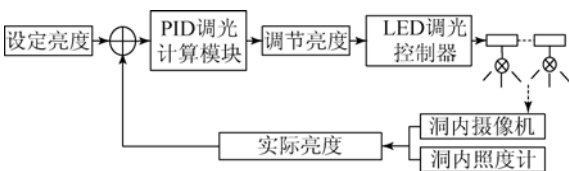


图2 PID调节控制单元调节原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of PID regulator control unit

3.2 PID调光原理

隧道照明闭环反馈智慧控制系统采用了增量式PID控制^[13-15]。增量式PID的表达式为:

$$u(n) = u(n-1) + k_p \frac{T}{t_1} [e(n) - e(n-1)] + ne(n) + k_p \frac{t_D}{T} [e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)], \quad (1)$$

式中: $u(n)$ 为第 n 次的输出值, $u(n-1)$ 为第 $n-1$ 次的输出值, $u(n-2)$ 为第 $n-2$ 次的输出值。由式(1)可知,如果要得出第 n 次的输出值,只需求第 $n-1$ 次的采样输出值,第 $n, n-1, n-2$ 次的偏差值,就能够比较容易地通过加权处理而获得比较好的控制效果。

在实际应用中,可以将式(1)简化为:

$$L_n = L_c + k_p \times e[k] + k_i \times e[k-1] + k_d \times e[k-2], \quad (2)$$

其中: L_c 是亮度实时监测单元通过测量图像灰度值,并将图像灰度值带入灰度与亮度计算模型计算获得的实际亮度值; $e[k]$ 为某一时刻设定亮度值与实际亮度值的差; $e[k-1]$ 为上一时刻设定亮度值与实际亮度值的差; $e[k-2]$ 为 $k-2$ 时刻设定亮度值与实际亮度值的差; L_n 是经过PID调节后计算的调节亮度值; k_p, k_i, k_d 分别为比例、微分、积分系数。

在进行PID调节控制时,首先应该判断设定亮度值和实际亮度值之差是否大于死区,如果两者差值大于死区,则利用公式(2)进行PID调节;如果两者差值小于死区,则不进行调节。其中,死区指的是允许的被控量的误差大小,这样可以抑制由于控制器输出量化造成的连续较小的振荡。

由PID调光原理可知,PID调光的前提条件是获得设定亮度值和实际亮度值。

4 车辆信息与环境信息采集单元

隧道照明闭环反馈的一个关键因素是获取设定亮度值。变电所中心控制服务器会以车辆信息采集单元和环境信息采集单元采集的车辆有无、车速、车流量、洞外亮度等信息为基础,根据照明细则计算洞内各个段的设定亮度值。

5 亮度实时监测单元

隧道照明闭环反馈控制的另一个关键因素是获取实际亮度值。本文采用了基于CCD摄像机利用图像灰度获得实际亮度的方法。

亮度实时监测单元主要由 CCD 摄像机和照度计组成。由 CCD 摄像机拍摄图像,利用图形处理软件获得图像灰度值,将图像灰度值带入已定的灰度与实际亮度转换模型,获得对象的实际亮度值。在应用 CCD 摄像机进行亮度测量前,标定 CCD 图像灰度与亮度之间的转换参数和转换模型是关键。具体标定过程为:首先通过理论推导获得图像灰度与 CCD 传感器感应的相对辐照度的关系,然后采用以均匀光源搭建的实验系统来标定 CCD 传感器相对辐照度与物面实际亮度之间的关系,进而获得图像灰度与物面实际亮度的转换关系。最后得出灰度与实际亮度的关系式为:

$$L_c = \frac{a}{t \cdot g_v} \cdot G - b, \quad (3)$$

式中: L_c 为物面实际亮度, t 为相机曝光时间, g_v 为相机增益, a, b 为常数系数。

应用 CCD 摄像机进行亮度测量前标定,其实质就是标定公式(3)中的系数 a, b 的数值。标定出 a, b 的数值后,由图像灰度(G)、曝光时间(t)、增益(g_v),根据式(3)就可以计算出物面的实际亮度。

5.1 图像灰度与相对辐照度关系的理论推导

CCD 中单一像素的理论电荷量计算公式^[16-18]为:

$$Q_m = \frac{\eta \delta S}{h\nu} \int_t E_c dt, \quad (4)$$

式中: Q_m 为像素的电荷量, η 为光电转换效率, δ 为电子电荷量, S 为像素面积, h 为普朗克常数, ν 为入射光辐射频率, t 为曝光时间, E_c 为像素接收的辐照度。式(4)中,曝光时间一般都很小,所以可以认为 E_c 在积分过程中不变,因此 Q_m 是曝光时间 t 的线性函数,令 $g_z = \frac{\eta \delta S}{h\nu}$ 为光电转换系数,则有:

$$Q_m = g_z E_c t. \quad (5)$$

光生电荷包经过转移之后通过 CCD 的输出结构转换成电压信号,电压信号经过模数(AD)转换变为数字信号,则该电荷包经转换得到的灰度值为:

$$G = g_o \cdot Q_m + o + \sigma_r = g_o g_z E_c t + o + \sigma_r = g_s E_c t + o + \sigma_r. \quad (6)$$

其中: G 是图像的灰度值, g_o 是通道的输出增益系数, o 是输出链路的直流偏置, σ_r 是输出链路中的随机噪声, g_s 是输出增益系数与光电转换增益系数的乘积。由式(6)可得传感器上的辐照度为:

$$E_c = \frac{G - o - \sigma_r}{t \cdot g_s} = \frac{G - o - \sigma_r}{t \cdot g_v \cdot g_t}. \quad (7)$$

式中: g_s 为两个增益的乘积, $g_s = g_v \cdot g_t$,其中 g_v 是模拟前端(Analog Front End, AFE)中可变增益放大器(Variable-Gain Amplifier, VGA)的增益, g_t 是光电转换增益系数和电路模拟增益的乘积,该增益因成像系统的不同而不同。考虑到单次采样时随机噪声 σ_r 不可知,并且电路的直流偏置会被 VGA 放大,因此,式(7)可以进一步改写为:

$$E_c = \frac{G - O_v}{t \cdot g_v \cdot g_t}, \quad (8)$$

式中 O_v 是根据 g_v 变化的直流偏置。 g_t 的计算相对复杂,不过成像系统确定后, g_t 为定值,因此在应用中不需要计算 g_t ,所以定义传感器的相对辐照度为:

$$E_r = g_t E_c = \frac{1}{t \cdot g_v} G - \frac{O_v}{t \cdot g_v}. \quad (9)$$

从式(9)中可以看出传感器相对辐照度 E_r 与图像像素灰度值 G 成线性关系。式(9)的第二项是噪声项,相对于第一项来说值很小,舍去第二项之后式(9)可简化为:

$$E_r = \frac{1}{t \cdot g_v} G. \quad (10)$$

从式(10)可知,传感器相对辐照度 E_r 与图像像素灰度值 G 的关系只与曝光时间和增益项有关,那么对于固定的 CCD,就可以根据图像灰度计算出传感器的相对辐照度。

5.2 图像灰度与实际亮度转换模型的建立

CCD 摄像机进行亮度测量的关键是标定图像灰度与实际亮度的转换关系和转换模型,即标定传感器相对辐照度与实际亮度的转换关系。标定系统如图 3 所示。



图 3 摄像机标定实验装置

Fig. 3 Experiment devices for camera calibration

标定系统主要由 CCD 摄像机、计算机、均匀光源^[19-21]和均匀光源控制器组成。在实验中 CCD 传感器与积分球相距 4 m 左右,使用亮度计测量均匀光源出光口的亮度值。利用均匀光源控制器,采用固定步长,从小到大调节出光口的光强值,每改变一次光强值就记录均匀光源出光口亮度计的读数;同时拍摄该光强下均匀光源的照片,并记录拍摄时的曝光时间 t 和增益 g_v 。实验中共测量得到 15 组实验数据。

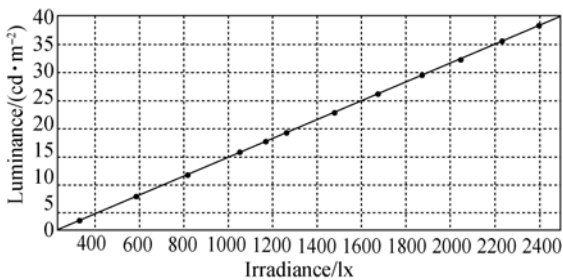


图4 实际亮度值与传感器辐照度值的关系

Fig. 4 Relationship between actual luminance and sensor's relative irradiance

然后,由图像灰度值、曝光时间和增益根据式(10)计算出传感器的相对辐照度,取图像中心 $10 \text{ pixel} \times 10 \text{ pixel}$ 的平均灰度值进行相对辐照度计算;将测量的均匀光源出光口亮度值与传感器的相对辐照度值描绘于坐标系中,如图4所示。采用最小二乘法拟合两者关系,获得线性方程:

$$L_c = 0.01684 \times E_r - 2.052. \quad (11)$$

将式(10)带入式(11),可获得实际亮度与图像灰度的关系:

$$L_c = \frac{0.01684}{t \cdot g_v} \cdot G - 2.052. \quad (12)$$

6 亮度调节及照明单元

经过 PID 调节控制单元计算获得调节亮度值,调节亮度值根据公式(14)转换成灯具的亮度控制等级信息,调光控制器将灯具等级指令信号转换成对应的脉冲信号。其中,灯具的调光协议使用的是数字可寻址照明接口协议。数字可寻址照明接口(DALI)协议^[22-24]是一种智能照明管理的先进理念,不仅高效节能、安装简捷,并且标准完全开放。

DALI 协议的调光曲线中定义了 255 个调光等级(取值从 1~255),其取值遵循对数调光曲线函数,其中 255 个调光等级所对应的灯光亮度值为 0.1%~100%。灯光亮度值与调光等级之间的转换公式可以由式(13)进行转换,其中 n 为 8 位的调光等级值, L_n 为与其对应的灯光亮度值。调光特性曲线中调光等级与灯光亮度值的转换公式为:

$$L_n = 10^{\frac{n-1}{255/3}-1}, \quad (13)$$

式(13)可以转换为:

$$n = \frac{255}{3} [\lg L_n + 1] + 1. \quad (14)$$

综上所述,由图像灰度、曝光时间、增益根据式(12)可获取实际亮度。由隧道内外传感器采集的数据为基础,根据隧道照明规范计算设定亮度。设定亮度与实际亮度经过式(2)的 PID 调节后得到调节亮度值,调节亮度值根据式(14)转换成调光等级。调光控制器将灯具亮度等级指令信号转换成对应的脉冲信号,通过 PWM 调光方式调整隧道洞内多个灯具的实际输出亮度达到实际需求。

7 实验设计及结果分析

为了验证隧道照明闭环反馈智慧控制系统的必要性和有效性,共进行了两类实验。第一类实验是 LED 隧道灯具的灯衰实验,主要目的是验证灯具的衰减,证明隧道灯具的照明存在衰减,如果不考虑衰减特性,灯具亮度则不能达到照明效果。第二类实验是照明闭环反馈控制系统实验,主要目的是验证利用 PID 调节可以较好地控制灯具亮度,使照明效果达到实际需求。

实验系统主要由 CCD 数码相机、照度计、4 盏 LED 隧道灯具、仿水泥墙纸、两台计算机组成。其中 CCD 数码相机是大恒图像公司开发的千兆以太网接口工业数字摄像机 DH-SV1421GM,用来拍摄路面图像,计算路面的实际亮度;照度计是台湾泰仕的 TES-1339R,用来测量路面的实际亮度;LED 隧道灯是台湾明纬生产的 HLG-185H-36B,其输出功率为 185 W,用来提供亮度;仿水泥墙纸铺设在地面上,用来模仿水泥地的路面效果;两台计算机主要用于处理实验数据。

7.1 LED 灯衰实验

在实验室,固定 LED 隧道灯位置后,长期以额定功率点亮 LED 隧道灯,照度计与 LED 隧道灯相距 50 cm。用照度计测得 LED 隧道灯的照度。每隔一个月左右的时间进行一次测量,共测得了 4 组数据,如表 1 所示。

从表 1 可以看出,随着时间的推移,LED 隧道灯光存在光衰现象,且光衰现象较为严重,会对隧道内的照明效果产生很大影响。

表 1 不同时间下 LED 隧道灯的照度

Tab. 1 Illuminance of tunnel light at different time

测量时间	照度/lx	衰减率/%
2014 年 5 月 13 日	24 964	—
2014 年 6 月 13 日	23 485	6.1
2014 年 7 月 13 日	23 130	7.7
2014 年 8 月 23 日	22 705	9.1

7.2 灯具照明闭环反馈控制实验

在实际隧道照明中,车辆进入隧道的过程是一个明亮—黑洞—明亮的过程。人眼在敏感交替变化的过程中,往往会产生“黑洞效应”,极易发生交通事故。所以隧道入口段的照明情况对行车安全具有至关重要的作用。由照明细则可知,对于最常见的非光学长隧道而言,隧道入口段通常分为两段:入口段 1 和入口段 2。其中入口段 1 的亮度调节范围较大,所以在实验室以隧道入口段 1 的照明需求为例进行布灯和闭环控制实验。

对于常见的非光学长隧道来说,根据照明细则可知,在一般车流量和车速情况下,入口段 1 的亮度应达到 105 cd/m^2 ,路面亮度总均匀度应达到 0.35 左右。以常见的单向双车道、宽度为 10.5 m、长度为 1 200 m、净高为 7.5 m 的非光学长隧道为例,在隧道入口段 1 使用 LED 隧道灯的功率为 180 W,灯具采用两侧对称的布置方式时,由 DIALUX 软件根据隧道的实际情况仿真可得,单侧灯具间距为 1.2 m,安装高度为 5 m,安装角度与水平方向成 30° ,路面平均亮度为 115 cd/m^2 ,均匀度为 0.42。为了实际应用,在实验室模拟隧道入口段 1 的环境进行了照明闭环反馈控制实验。现有的实验室环境长为 5 m,宽为 3.52 m,高为 3 m,可用的 LED 灯具功率为 185 W。使用 DIALUX 软件对实验室环境进行仿真,在灯具安装高度为 2.5 m,单侧灯具间距为 2.5 m,安装宽度为

3.52 m,安装角度与水平方向成 30° 时,路面平均亮度可达到 110 cd/m^2 ,均匀度为 0.56,在实验室根据这个仿真条件进行实验。

夜晚在暗室环境下,采用两侧对称布置的方式将 4 盏 LED 隧道灯固定置于高 2.5 m 处,与水平方向成 30° 向下照射地面,单侧 LED 隧道灯之间相距 2.5 m;CCD 摄像机放置在高 2.3 m 处,且在地面上铺设一层仿水泥墙纸。实验时各传感器的连接方式如图 5 所示。图 6 为实验室内的实验系统图。

将 4 盏 LED 隧道灯与调光控制器连接好,将调光控制器通过串口线 2 与计算机 2 相连,将 CCD 摄像机通过网线与计算机 1 相连,计算机 1 与计算机 2 之间通过串口线 1 进行连接。闭环反馈控制系统的工作流程为:给每个传感器通电,用 CCD 数码相机拍摄 LED 隧道灯照射的路面区域,获取路面图像后,将路面图像分成 10×10 个网格区域;计算机 1 根据事先标定的图像灰度值与路面实际亮度的转换公式,计算路面图像 10×10 个网格顶点的实际亮度值,然后计算这 100 个路面点的平均亮度并作为路面平均亮度,将路面平均亮度值通过串口线 1 传给计算机 2;计算机 2 上运行 PID 自适应调节单元,由设定亮度值和实际亮度值根据式(2)计算出调节亮度值;计算机 2 根据式(14)将调节亮度值转换成对应的调光等级,然后将调光等级通过串口线 2 传给调光控制器;最后,调光控制器将调光指令转换成对应的脉冲信号,通过 PWM 调光方式统一调整 4 盏灯具的亮度。

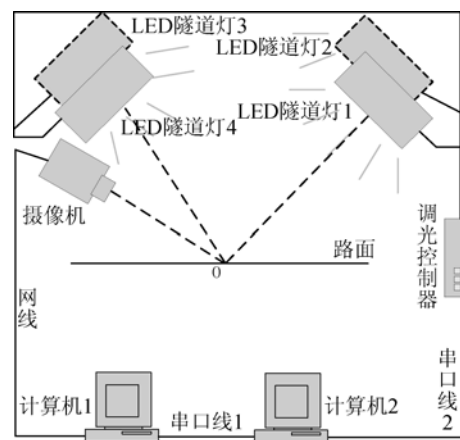


图 5 灯具照明闭环反馈控制实验示意图

Fig. 5 Schematic diagram of lighting closed-loop feedback control experiment



图 6 照明闭环反馈控制实验系统图

Fig. 6 System diagram of lighting closed-loop feedback control experiment

隧道照明节能智慧控制技术的关键在于当有车进入隧道时,可依据照明细则的要求,以当前隧道内的交通量、车速以及环境亮度等情况对隧道进行按需照明;无车进入隧道时,隧道照明系统调节至低耗能状态。这里以非光学长隧道的入口段 1 为例,有车进入隧道时,隧道入口段 1 的路面平均亮度应达到 105 cd/m²;无车进入隧道时,隧道入口段 1 应调节至低耗能状态,照明亮度应为灯具额定亮度的 10%。为了模拟隧道内的照明控制,选取两组实验数据。第一组是当有车进入隧道时,将隧道内路面的平均亮度由低耗能状态时的 11 cd/m² 调节为 105 cd/m²,此时设定亮度为 105 cd/m²,死区设为 3 cd/m²,期望亮度值在 102~108 cd/m²,即允许的误差为 ±2.86%。第二组是无车进入隧道时,将隧道内路面的平均亮度由 105 cd/m² 调节为 11 cd/m²,此时设定亮度为 11 cd/m²,死区设为 0.5 cd/m²,期望亮度值在 10.5~11.5 cd/m²,即允许的误差为 ±4.55%。实验时,通过多次改变参数 k_p, k_i, k_d ,查看每组 PID 调节参数对应的实际亮度的调节情况,最后确定一组对于该系统调节效果较好的 PID 调节参数,并将此参数下实际亮度的调节变化规律描绘于图 7、图 8 中。

在实际应用中,需要根据系统的特性来获得合适的 PID 调节参数。图 7 中,折线表示实际亮度的变化规律,其中直线实线表示设定亮度值为 105 cd/m²,两条虚线之间的部分表示期望亮度值的区间。图 8 中,折线表示实际亮度的变化规律,

其中直线实线表示设定亮度值为 11 cd/m²,两条虚线之间的部分表示期望亮度值的区间。由图 7、图 8 可知,采用此 PID 调节参数可以较快地将实际亮度调节到期望亮度区间内,且稳定在设定亮度值附近。

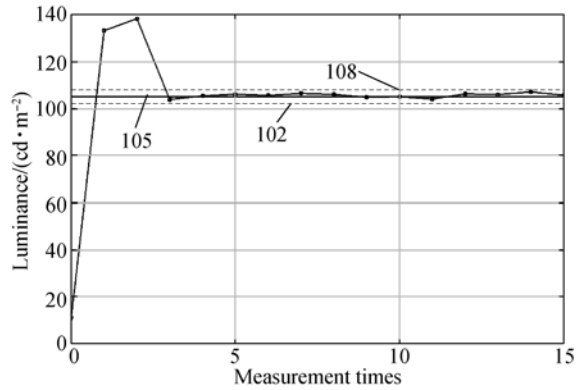


图 7 路面平均设定亮度为 105 cd/m² 时的 PID 调节效果

Fig. 7 Effect drawing of PID regulator with average setting luminance of 105 cd/m²

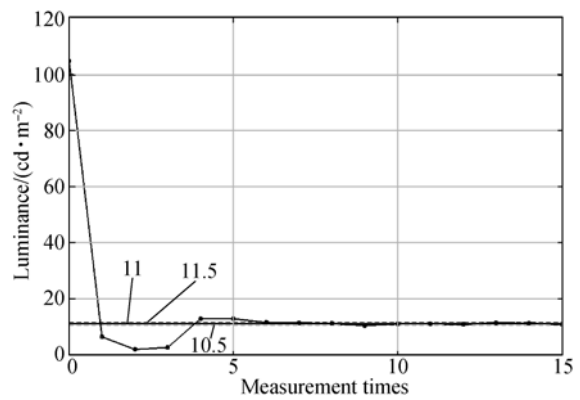


图 8 路面平均设定亮度为 11 cd/m² 时的 PID 调节效果

Fig. 8 Effect drawing of PID regulator with average setting luminance of 11 cd/m²

8 结 论

本文设计了一种隧道照明闭环反馈智慧控制系统。与现有的隧道智能照明系统相比,本系统的优势主要体现在两个方面:一是系统中采用了摄像机图像路面亮度测量法,该方法以监测摄像机采集的图像信息为基础,通过图像灰度与亮度转换来实时获得隧道路面的亮度;二是本系统采

用了 PID 智能控制单元,该单元使得系统能够通过闭环反馈调节隧道内路面的实际亮度与所需的照明亮度实时保持一致。实验证明,该系统

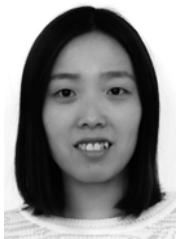
可靠、自适应性强,能够保证行车安全并使人眼获得最佳的视觉感受,具有较高的实用性和推广价值。

参考文献:

- [1] 潘海龙,周雄维,罗全明,等. LED 隧道照明智能控制系统[J]. 测控技术,2011(8):49-52.
PAN H L, ZHOU L W, LUO Q M, *et al.*. LED tunnel lighting intelligence control system [J]. *Measurement & Control Technology*, 2011(8): 49-52. (in Chinese)
- [2] 路杨,黎碧波,张春化,等. 高速公路隧道 LED 照明智能控制示范应用[J]. 机电信息, 2014(9): 106-107.
LU Y, LI B B, ZHANG CH H, *et al.*. Demonstration application of highway tunnel LED lighting intelligent control [J]. *Electromechanical Information*, 2014(9): 106-107. (in Chinese)
- [3] 王少飞,邓欣,吴小丽. 公路隧道照明控制技术综述[J]. 公路交通技术,2010(4):132-146.
WANG SH F, DENG X, WU X L. Highway tunnel lighting control technology [J]. *Highway Traffic Technology*, 2010(4): 132-146. (in Chinese)
- [4] 孙发恩. 高速公路隧道照明控制系统设计与研究[D]. 广州:华南理工大学,2012.
SUN F E. *The Design and Study of Highway Tunnel Lighting Control System* [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [5] 赵丰丰. 隧道 LED 照明无线智能控制系统[D]. 西安:西安工业大学,2013.
ZHAO F F. *LED Tunnel Lighting Wireless Intelligent Control System* [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [6] 蒋水秀,郭姍,林剑波. 智能 LED 隧道照明控制系统设计[J]. 公路交通科技:应用技版,2012(6): 409-411.
JIANG SH X, GUO SH, LIN J B. Design of LED tunnel lighting intelligent control system [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development: Application Technology Edition*, 2012(6): 409-411. (in Chinese)
- [7] 徐一鸣,谢耀华. 隧道照明多元控制系统研究[J]. 公路交通技术,2013(1):129-131.
XU Y M, XIE Y H. Study of multiple tunnel lighting control system [J]. *Highway Traffic Technology*, 2013(1): 129-131. (in Chinese)
- [8] 刘社章,秦大为. 道路照明的亮度测量方法[J]. 电工技术,2009(3):10-12.
LIU SH ZH, QIN D W. A measurement method of road lighting [J]. *Electric Engineering*, 2009(3): 10-12. (in Chinese)
- [9] 赵亚辉,范长江. 组合式发光二极管路灯反射器的设计[J]. 中国光学,2012(5):520-524.
ZHAO Y H, FAN CH J. Design of combined reflectors used in LED street lamps [J]. *Chin. Opt.*, 2012(5): 520-524. (in Chinese)
- [10] 中华人民共和国行业标准. JTJ/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.
People's Republic of China industry standards. JTJ/TD 70/2-01-2014 Guidelines for Design of Lighting of Highway Tunnels [S]. Beijing: China Communications Press, 2014. (in Chinese)
- [11] 张玲,郝翠霞. LED 隧道照明控制系统的研究与开发[J]. 照明工程学报,2011(4):36-40,45.
ZHAN L, HAO C X. Study and development of LED tunnel lighting control system [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2011(4): 36-40, 45. (in Chinese)
- [12] GACIO D, ALONSO J M, GARCIA J, *et al.*. PWM series dimming for slow-dynamics HPF LED drivers: the high-frequency approach, industrial electronics [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(4): 1717-1727.
- [13] ZHANG J, YANG S. An incremental-PID-controlled particle swarm optimization algorithm for EEG-data-based estimation of operator functional state [J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2014, 14: 272-284.
- [14] SONG H, HU C, WANG L, *et al.*. Design of a new high accuracy incremental PID controller with dual temperature sensors [C]. *Control and Decision Conference (CCDC)*, IEEE, 2012: 712-715.
- [15] GUO Q C, DONG Y J, XIAO F L. An incremental PID barrier controller system used in railway crossing [J]. *International Journal of Advances in Computing Technology*, 2011, 3(4): 14-20.

- [16] 王庆有. 图像传感器应用技术[M]. 北京:电子工业出版社,2003.
WANG Q Y. *Application Technology of Image Sensor* [M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2003. (in Chinese)
- [17] 吴厚德,许文海. 多输出 CCD 接缝的校正[J]. 光学精密工程,2013(2):454-461.
WU H D, XU W H. Correction of multiple output CCD seam [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013(2):454-461. (in Chinese)
- [18] 李静,王军政,马立玲. 一种高精度 CCD 测试系统的非均匀性校正方法[J]. 北京理工大学报,2010(4):451-455.
LI J, WANG J ZH, MA L L. A non-uniformity correction method of a high precision CCD test system [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2010(4):451-455. (in Chinese)
- [19] 沈湘衡,杨亮,贺庚贤,等. 光电测量设备光学系统的像面照度均匀性检测[J]. 光学精密工程,2008,16(12):2531-2536.
SHEN X H, YANG L, HE G X, *et al.*. Measurement of image plane illumination non-uniformity of optical system in photoelectric equipment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(12):2531-2536. (in Chinese)
- [20] KUMAR T S S, KURIAN C P. Commissioning of camera calibration factor for luminance measurement [J]. *Advances in Energy Conversion Technologies (ICAEECT)*, 2014 *International Conference on*, 2014(23-25):193-197.
- [21] 徐文清,詹杰,徐青山. 天空背景亮度测量系统的研制[J]. 光学精密工程,2013(1):46-52.
XU W Q, ZHAN J, XU Q SH. Development of instrument for sky background brightness [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013(1):46-52. (in Chinese)
- [22] WANG SH CH, LIU Y H, CHEN Y L, *et al.*. Development of DALI based electronic ballast with energy saving control for ultraviolet lamp lamps [J]. *Industrial Informatic (INDIN)*, 2010 *8th IEEE International Conference on*, 2010(13-16):214,219.
- [23] 郑泽民. 基于 DALI 的 LED 调光驱动系统设计[D]. 上海:华东理工大学,2014.
ZHENG Z M. *Design of LED Dimming Drive System Based on DALI* [D]. Shanghai: East China University, 2014. (in Chinese)
- [24] 史涛. 支持 DALI 协议的智能照明探测模块技术研究[D]. 广州:广东工业大学,2014.
SHI T. *Study of Intelligent Lighting Detection Module Technology with the DALI Protocol* [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2014. (in Chinese)

作者简介:



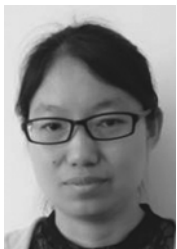
秦莉(1990—),女,安徽砀山人,博士研究生,2013年于大连海事大学获得学士学位,主要从事光电检测、信息处理等方面的研究。Email:1073015583@qq.com

导师简介:



许文海(1956—),男,吉林扶余人,教授,博士生导师,1982年、1984年、1991年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,1993年于东京工业大学获得博士学位,主要从事水下探测、光电检测与光电信息等方面的研究。E-mail:whxu@dlnu.edu.cn

通讯作者:



董丽丽(1980—),女,博士,副教授,2002年、2004年、2008年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要研究方向为光电信息与光电检测等。E-mail:dll_lili@163.com