

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2017.10.013

隧道照明智能监控软件系统的设计与实现

张利东¹, 秦莉², 蒋海涛², 董丽丽²

(1. 吉林省高等级公路建设局, 吉林 长春 130012; 2. 大连海事大学 信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 为了设计和实现“车进灯亮、车走灯暗”的隧道照明智能监控软件系统, 采用车辆行为感知传感器、环境信息感知传感器、监控摄像机、调光控制器、LED照明灯具等设备为系统的硬件基础。软件系统以照明节能和智慧控制为目的; 以隧道外部环境亮度、车流量和车辆速度为数据基础, 根据隧道照明设计细则计算隧道内部各路段的所需亮度; 以监控图像为基础, 利用图像处理的方法, 实时测量隧道内部路面的实际亮度; 利用闭环反馈自适应调光方法根据隧道实际照明亮度和所需亮度对隧道亮度进行有效的调节; 通过对路面均匀度的判断, 确定隧道内灯具的好坏, 从而实现快速维护。监控软件已在吉林省通化市赤柏隧道(右幅)投入使用, 使用过程中选择车流量和天气情况都相似的3天, 分别采用智能监控软件系统的方法、时间控制的方法和隧道内灯具全亮的方法对3种方法的耗电量进行比较。结果表明, 该智能软件系统的方法在保证驾驶员安全舒适的前提下, 相比于时间控制的方法节能超过40%; 相比于灯具全亮的方法节能超过50%。

关键词: 隧道工程; 软件系统设计; 智慧控制; 监控软件; 图像处理

中图分类号: U453.7, TP18

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2017)10-0092-08

Design and Implementation of Intelligent Monitoring Software System for Tunnel Lighting

ZHANG Li-dong¹, QIN Li², JIANG Hai-tao², DONG Li-li²

(1. Jilin Provincial High-grade Highway Construction Bureau, Changchun Jilin 130012, China;

2. School of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026, China)

Abstract: In order to design and implement a “vehicle enters, light brightens, vehicle leaves, light darkens” software system for tunnel lighting intelligent monitoring, vehicle behavior detection sensors, environmental information perception sensors, surveillance cameras, dimming controller, and LED luminaries are used as the hardware foundation of the system. The aim of software system is lighting energy-saving and intelligent control. The demand luminance of each tunnel zone is calculated according to the tunnel lighting design rule based on tunnel exterior environmental luminance, traffic volume and vehicle speed. The actual luminance of the pavement in each zone of the tunnel is measured through image processing. The method of adaptive closed-loop feedback luminance adjustment is adopted to effectively adjust tunnel lighting luminance on the basis of the actual and demand luminance in the tunnel. The status of tunnel luminaries (work or does not work) can be determined by analyzing the overall uniformity of road surface luminance, and luminaries can be maintained timely. The monitoring software has been implemented in Chibai Tunnel (right hole) in Tonghua City, Jilin Province. Three days with same traffic and weather conditions are selected during the implement to compare energy consumptions of the method of intelligent monitoring software system, sequential control method and the method of all luminaries lit on. The result shows that the method of intelligent software system control can save at least 40% energy compared to sequential control method and at least 50% energy

收稿日期: 2016-12-09

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(3132016351); 吉林省交通运输厅科技项目(2014-4-1-3)

作者简介: 张利东(1966-), 男, 吉林通化人, 研究员。(ZLD7296@126.com)

compared to the method of all luminaries lit on besides it can also ensure drivers' safety and comfort.

Key words: tunnel engineering; software system design; intelligent control; monitoring software; image processing

0 引言

近年来,我国高速公路的建设规模不断扩大^[1-3],在中西部地区及多山地区,往往需要建成很多高速公路隧道才能通车。由于隧道的特殊性,之前在高速公路隧道运营中,无论是白天黑夜,有车无车,隧道内的灯具多数情况下都是长期点亮,电能浪费十分严重^[4-7]。此外,由于灯具本身的一些特性,在灯具使用一段时间后,其本身的光亮度会存在一定的衰减,所以隧道维护人员会每隔一段时间对隧道进行封路,来测量隧道内实际的亮度,查看当前灯具的光亮是否满足隧道内照明要求^[8-9]。这种测量亮度的方法虽然可以完成既定目标,但是比较繁琐,给隧道运营带来了不便,也给隧道维护人员带来了安全隐患。此外,对于隧道灯具状态的监测,隧道维护人员经常需要在隧道现场行走查看,比较浪费时间和精力。

为了解决当前隧道照明应用中存在的上述问题,本研究设计并实现了 1 种包含智能调光、实时监测和反馈控制功能的隧道照明智能监控软件系统。

1 隧道监控系统功能

为了实现隧道照明“安全第一、以人为本、按需照明、节能减排”的宗旨,隧道照明智能监控软件需要具备以下功能:

1.1 车进灯亮、车走灯暗

有车进入隧道时,隧道照明系统需要提前获知该信息,并启动照明;无车时,为了节能隧道照明系统将灯具调节至低能耗状态(额定照明输出的 10%)。

1.2 按需照明

隧道照明系统以《公路隧道照明设计细则》(JTG/T D70/2-01—2014)^[10]为依据,以洞外亮度、车流量、车速为基础提供按需照明亮度,尽可能地节电节能。

1.3 实际亮度测量

照明系统提供的照明,应该保证实际亮度能达到照明要求,因此有必要掌握隧道内实际亮度情况。

1.4 闭环反馈功能

为了使隧道内实际亮度达到需求,系统能够以

设定的亮度值和实际的亮度值为基础实现闭环反馈,及时调整光源亮度以保证实际亮度满足需求。

1.5 方便管理

隧道维护人员可以在隧道变电所了解隧道的照明状态和灯具情况,并能够对照明状态进行实时调节。

2 隧道照明系统硬件结构

隧道照明智能监控软件的应用需要以隧道照明智能系统的硬件为基础,硬件系统结构如图 1 所示。

由图 1 可知,硬件系统主要由车辆行为感知设备、环境信息感知设备、摄像机、局端调光控制器、远端调光控制器、灯具以及服务器等组成。

2.1 车辆行为感知设备

车辆行为感知设备由红外探测器、线圈车辆检测器组成,分别安装在洞内和洞外。洞外的传感器主要负责检测洞外是否有车即将进入隧道,并统计车速、车流量等信息,是保证“车进灯亮”的硬件基础。洞内的传感器用于感知车辆是否经过入口段和过渡段,是保证入口段和过渡段“车走灯暗”的硬件基础。

2.2 环境信息感知设备

环境信息感知设备主要包括洞外光强检测器和洞内光强检测器,洞外光强检测器主要负责实时采集洞外亮度;洞内光强检测器主要负责采集隧道内某点的实时照度。环境信息感知设备是实现“按需照明”和“实际亮度测量”的硬件基础。

2.3 监控摄像机

监控摄像机固定安装在隧道内侧壁上^[11-13],每隔 120 m 安装 1 台,所有摄像机拍摄的区域能够覆盖隧道内所有的路面,它们主要负责实时拍摄洞内的路面情况,用于后续的图像处理,是实现实际亮度测量、闭环反馈功能和整个隧道车走灯暗功能的硬件基础。

3 隧道照明智能监控软件的结构

隧道照明智能监控软件由界面显示模块、亮度解算模块、图像处理模块、闭环反馈系统模块、调光指令发送模块以及数据库存储模块组成。隧道照明智能监控软件的结构图如图 2 所示。

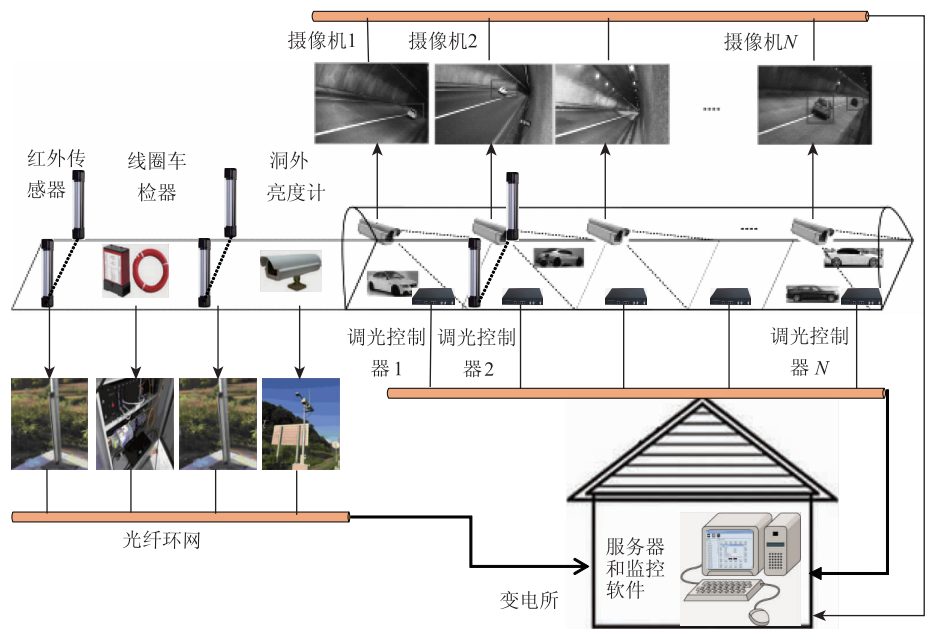


图 1 隧道照明智能监控系统硬件结构

Fig. 1 Hardware structure of tunnel lighting intelligent monitoring system

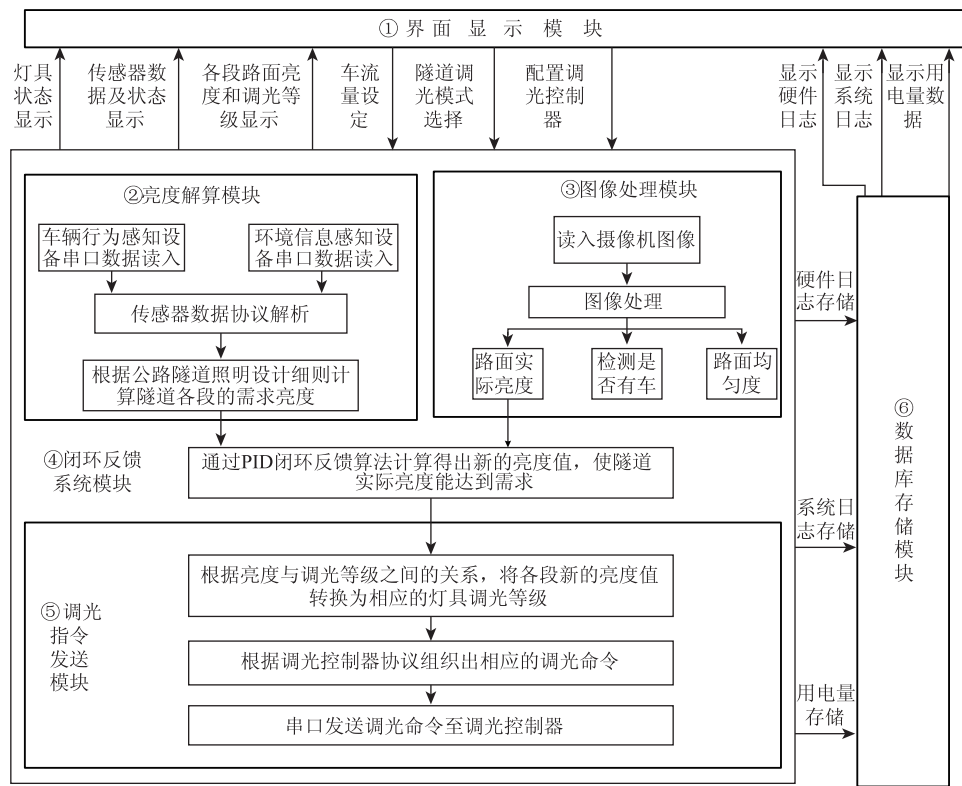


图 2 隧道照明智能监控软件结构

Fig. 2 Software structure of tunnel lighting intelligent monitoring

3.1 界面显示模块

界面显示模块以界面的形式向用户显示各段的灯具状态、传感器数据及运行状态、隧道内各段的调光等级及实际亮度等信息，同时通过对界面的操作实现对车流量的设定和对调光控制器属性的设定。

3.2 亮度解算模块

亮度解算模块接收车辆行为感知设备和环境信息感知设备的数据，以实时洞外亮度、车速、车流量以及隧道单双向等信息为输入，以公路隧道照明设计细则为基础计算适合隧道各段的当前亮度需求。

3.3 图像处理模块

图像处理模块接收监控摄像机的图像, 以此为基础通过图像处理方法获取隧道内有车无车状态^[14-15]、隧道实际亮度和路面均匀度。其中, 隧道内是否有车作为是否将隧道调暗的重要条件之一; 在隧道内无车时, 通过图像计算得出隧道实际亮度实现了对亮度的实时监测, 也为下一步闭环反馈系统的实现提供了输入; 通过路面实际照度可以计算得出路面的均匀度, 用以判断隧道内灯具的好坏。

3.4 闭环反馈系统模块

PID 闭环反馈模块以亮度解算模块计算得出的各段所需亮度值和图像处理模块计算得出的实际亮度值作为闭环反馈系统的输入, 根据二者之间的差值, 重新计算得出灯具的实际照明控制亮度, 使隧道内路面的实际亮度能达到需求。

3.5 调光指令发送模块

以调光等级与路面亮度之间的转换曲线为基础, 将闭环反馈系统输出的各段亮度值转化为相应的百分比调光等级, 实现对整个隧道灯具的调光控制。

3.6 数据库存储模块

将系统日志、硬件日志和用电量数据等都存储在数据库中, 方便用户在界面上查看相关信息。

4 隧道照明智能监控软件的运行机制

隧道照明智能监控系统^[16]的运行过程框图如图 3 所示。

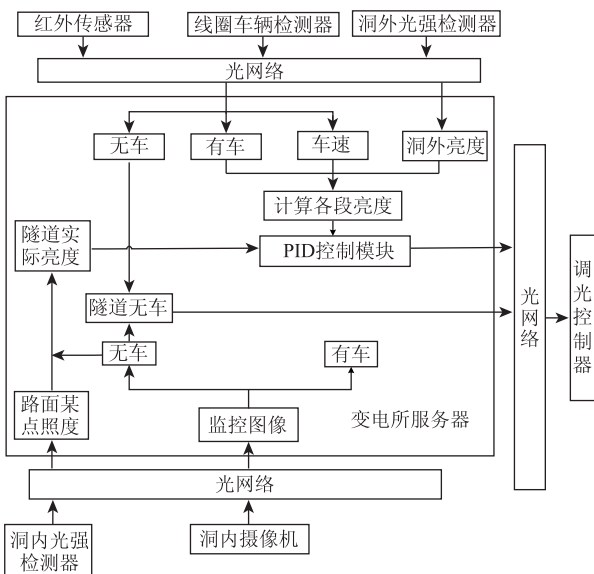


图 3 隧道照明智能监控软件系统的运行简图

Fig. 3 Operation diagram of tunnel lighting intelligent monitoring software system

当隧道外部车辆行为感知设备检测到有车辆即将进入隧道时, 变电所内的隧道监控系统软件会根据公路隧道照明设计细则以车速、车流量以及洞外亮度等信息计算隧道各段所需亮度; 同时通过对监控摄像机图像的实时处理, 并结合洞内光强检测器测量地面某一点的照度值, 可计算出隧道内的实际亮度; 然后以各段的需求亮度值和各段的实际亮度值作为 PID 控制模块^[17-18]的输入, 重新计算得出隧道各段的调光等级, 使得隧道内部实际亮度能够达到所需亮度的要求, 并通过光网络向各调光控制器发送调光指令。

当利用隧道内监控图像检测到隧道内部没有车辆行驶, 且此时, 隧道外部的车辆检测器也检测到隧道外部没有车辆即将进入隧道时, 隧道内部照明灯具的亮度将调至低能耗状态 (一般为额定功率的 10%)。

5 照明亮度解算说明

当前, 我国隧道照明的设计和实现需要遵循公路隧道照明设计细则。亮度解算模块的流程如图 4 所示, 隧道监控系统软件在串口初始化之后, 开始接收车辆行为感知设备和环境信息感知设备的数据, 并根据相应的传感器数据协议解析相应的传感器数据, 从中解析出实时洞外亮度、车速和有无车辆的信息, 并根据公路隧道照明设计细则分别计算入口段 1、入口段 2、过渡段、中间段、出口段 1 和出口段 2 的所需亮度, 作为下一步闭环反馈系统的输入之一。图 4 中 $L_{20}(S)$ 是隧道洞外的实时亮度, L_{th1} 是入口段 1 的亮度, L_{th2} 是入口段 2 的亮度, L_t 是过渡段的亮度, L_{in} 是中间段的亮度, L_{ex1} 是出口段 1 的亮度, L_{ex2} 是出口段 2 的亮度。

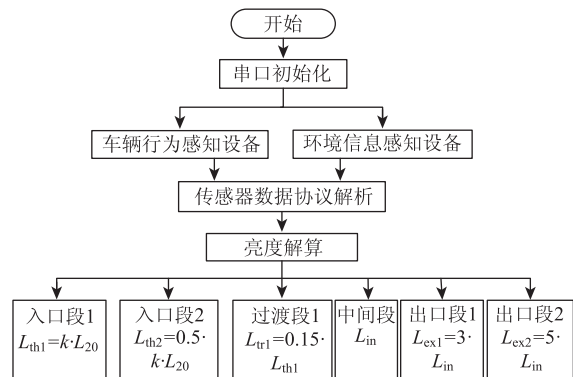


图 4 亮度解算模块流程图

Fig. 4 Flowchart of brightness solution module

6 隧道内车辆检测方法说明

通过图像处理检测出隧道内是否有车,是将隧道调至低能耗状态的重要条件之一。检测隧道内是否有车的流程如图5所示。

车辆检测具体步骤为:(1)获取无车背景图像,方法为每当隧道照明控制系统调节亮度时,监控摄像机连续抓取多帧图像,求取多帧图像的平均图像,将其作为当前照明亮度下的背景图像,存放于背景库中;监控摄像机实时采集隧道内部图像。(2)根据隧道内部路面图像的特征,分别

截取实时图像和无车背景图像的感兴趣区域。(3)利用背景差分法对2张图像感兴趣区域进行操作,获得差分图像。(4)对差分图像利用canny算子进行边缘检测处理^[19]。(5)对边缘检测后的图像进行分块处理,统计特定块图像内的非零点个数。(6)处理各个块,通过阈值检测,判定车辆的有无。(7)如果检测结果为无车,则用当前的实时图像替代背景库中当前照明亮度下的背景图像,达到实时更新背景图像的目的,并用此帧图像计算隧道路面实际亮度;如果检测结果为有车,则继续进行下一帧图像检测。

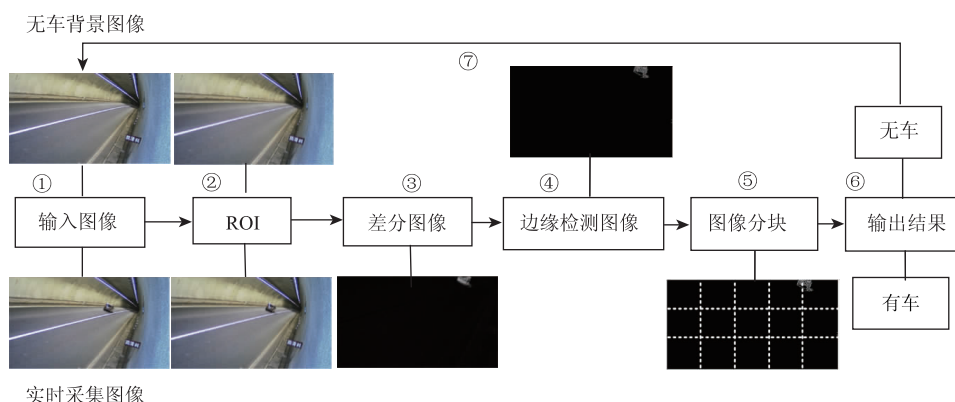


图5 检测隧道内是否有车的流程图

Fig. 5 Flowchart of vehicle detection in tunnel

7 隧道实际亮度及均匀度测量方法说明

通过图像处理计算隧道的实际亮度,为下一步闭环反馈系统的实现提供了输入,也方便了隧道管理人员对隧道路面的监测管理。计算实际亮度的流程如图6所示。

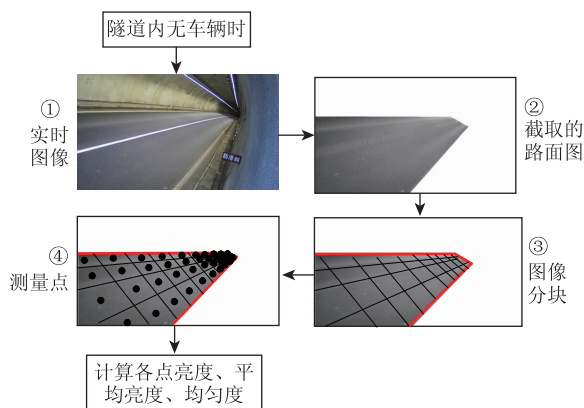


图6 计算路面亮度的流程图

Fig. 6 Flowchart of calculating brightness on pavement

当通过图像处理检测到摄像机内无车时,就开始计算隧道实际亮度。利用霍夫变换检测无车图像

内隧道路面两侧的标志线,通过标志线将整个路面提取出来,根据距离和角度对图像的影响因子来对路面图像进行距离和灰度校正,实现路面图像灰度值的归一化,再根据摄像机所处的不同位置,将摄像机所拍的图片进行相应的分块,把洞内光强检测器实时测量隧道内路面上某点的照度读数作为标准,将图像④中的路面黑点区域的灰度值转换为照度值,再将照度值转换为亮度值,由此完成对隧道实际亮度的计算。

通过图像处理计算得出路面各点的照度后,可以利用照度计算出路面均匀度,以此来判断隧道内灯具的好坏。在计算得出隧道路面各点照度之后,利用下式计算各摄像机所拍摄路面的均匀度。

$$U_o = \frac{E_{\min}}{E_{\text{av}}}$$

式中, E_{av} 为平均照度; $E_{\min}$ 为各块路面上的最小照度; U_o 为路面总均匀度。

经过在赤柏隧道现场的测试,路面均匀度在0.71~0.75之间变化。如若存在灯具损坏不亮的情况,那么计算得出的路面均匀度就会小于上述的范围,并可以根据图像的来源快速判断出灯具在隧道

中的位置, 并在界面上显示出来, 实现快速维护。

8 照明亮度的闭环反馈控制

由于灯具光的衰减等一些因素, 隧道内实际的亮度和需求的亮度会存在一定的差异, 为了使隧道的实际亮度能达到需求的亮度, 本研究闭环反馈系统采用了增量式 PID 控制, 其隧道照明闭环反馈系统如图 7 所示。

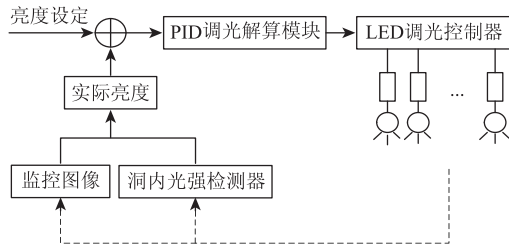


图 7 闭环反馈系统示意图

Fig. 7 Schematic diagram of closed-loop feedback system

在 PID 闭环反馈控制系统中, 以设定的亮度值和处理图像后得到的实际亮度值作为闭环反馈系统的输入, 根据二者之间的误差, 重新计算得出灯具的照明控制亮度, 使隧道内的实际亮度能达到需求。

9 不同照明模式下的用电量对比分析

本研究隧道照明智能监控软件的最初设计和实

现以吉林省通化市赤柏隧道(右幅)改造工程为基础进行的。赤柏隧道(右幅)内部采用单向双车道高速公路标准, 全长 1 878 m, 净宽 10.5 m, 净高(拱高) 7.45 m。其中设计车速为 80 km/h, 设计车流量小于 350 veh/(h · ln)。该隧道改造工程于 2015 年 9 月完工并通过了第三方鉴定。自 2015 年 9 月至今, 隧道照明智能监控软件运行情况良好, 为了确定采用智能控制后隧道照明节能的效果, 对隧道照明系统在自动模式、全亮模式(调光等级为 80%)和时间模式下的用电情况进行了对比分析。

图 8 显示了 2016 年 1 月 12 日、1 月 13 日和 1 月 14 日这 3 天的用电量信息, 隧道照明系统在这 3 天中采用的工作模式分别是: 自动模式、全亮模式(调光等级为 80%)和时间模式。

用于测试的这 3 天的交通参数和其他参数如表 1 所示。从表 1 可以看出, 用于测试不同调光工作模式的 2016 年 1 月 12 日、1 月 13 日和 1 月 14 日, 这 3 天的交通量相差不超过 30 veh, 可以认为无差别, 且车辆的平均车速几乎相同, 所以车流量、车速情况可以认为是一样的。而且天气情况、日出和日落时间都是相似的, 所以洞外亮度条件是一样的。因此, 选取的这 3 天在客观条件上是不会对节能效果产生任何影响, 可以认为节能效果全部是由调光控制模式的不同产生的。



图 8 用电量界面图显示

Fig. 8 Display of interface of energy consumption

表 1 三天内的参数比较

Tab. 1 Comparison of parameters during 3 days

日期	交通量/ (veh · d ⁻¹)	一天内所有车辆 速度的平均值/ (km · h ⁻¹)	天气 情况	日出 时间	日落 时间
2016-1-12	823	60.91	晴	7:36	17:10
2016-1-13	790	61.11	晴	7:36	17:11
2016-1-14	829	61.93	晴	7:35	17:12

从软件的运行结果来看, 隧道监控系统在自动模式下是最节能的, 主要原因有以下 2 个: “车进灯

亮, 车走灯暗”的智能控制和按需照明。其中, 灯亮和灯暗的时间由隧道内有车无车来决定; 而按需照明的亮度则受到隧道实时洞外亮度的影响。下面以 2016 年 1 月 12 日一天的监测情况为例来分析隧道内的照明及节能情况。

隧道照明监控系统软件具有存储各传感器数据的功能。根据对存储数据的统计和处理可知, 2016 年 1 月 12 日一天内, 隧道的照明灯调暗时间如图 9 所示, 而隧道外亮度变化情况如图 10 所示, 一天内

隧道各个时段的车流量情况如图 11 所示。

本隧道照明监控系统是 1 种“车进灯亮，车走灯暗”的自动控制系统，当隧道内无车时，会将隧道各段的灯具调至最低能耗状态。图 9 显示了 1 月 12 日一天 24 小时内每个小时的灯暗时间，通过图 9 可以看出，在 0:00—6:00 时和 21:00—24:00 时这 2 个时段内，由于车流量较小，灯具调暗的时间相对较长，最长的调暗的时间达到了 54 min，节能效果明显。剩余时段由于车流量相对较大，调暗的时间也相对缩短。通过统计累加，赤柏隧道 1 天调暗的时间达到了 602 min，一天为 1 440 min，简单按灯具调暗的时间比例估算，采用自动模式与全亮模式相比，1 天可节约电能约 40%。而在自动模式下，每当监控系统检测到有车即将进入隧道时，隧道照明监控系统软件会依据当前的洞外亮度来计算当前所需的最佳照明亮度，并不简单地将照明灯具开启到额定照明亮度。

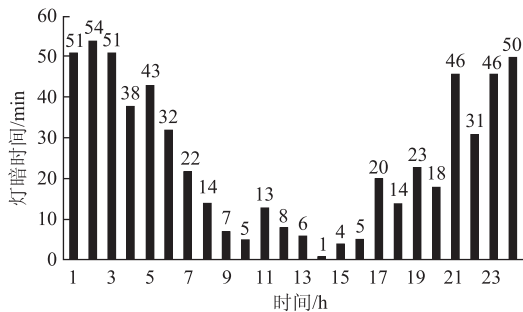


图 9 1 月 12 日各时段的调暗的时间长度表

Fig. 9 Time of LEDs adjusted to minimum luminance at different periods (2016-01-12)

图 10 给出了洞外光强检测器检测到的洞外亮度变化情况。从图 10 中可以看出，在 0:00—7:00 时和 16:00—24:00 时这 2 个时段内，洞外亮度相对较低，因此，即使在隧道内有车需要照明的情况下，隧道各段的调光等级也会随之降低，相对于额定照明亮度这会节省大量的电能；在 7:00—16:00 时这个时段内，洞外亮度先呈上升趋势，后呈下降趋势，隧道各段调光等级也是先上升后下降，进行“按需照明”。图 11 给出了一天之内，隧道各个时段的车流量数据。由图 11 可以看出，在 0:00—6:00 时和 20:00—24:00 时这 2 个时段内，隧道内的车辆数相对较少，都小于 20 veh/h。其他时段的车流量最大，其中最大的可达 71 veh/h。

表 2 为赤柏隧道的实际电表测量值。由于赤柏隧道现场电表不能单独测量赤柏隧道右幅的用电量，所以表 1 中显示的电量值是整个赤柏隧道（包括左幅和

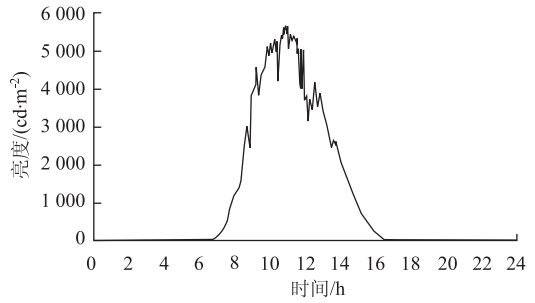


图 10 1 月 12 日洞外亮度变化图

Fig. 10 Change of brightness outside tunnel (2016-01-12)

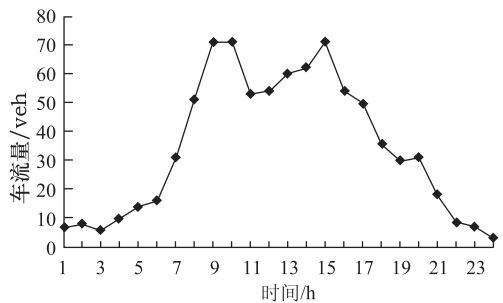


图 11 2016 年 1 月 12 日隧道车流量数据

Fig. 11 Traffic volume in tunnel (2016-01-12)

右幅)的用电量(赤柏隧道的左幅未采用本研究提及的智能控制策略，隧道灯具全天都以不变的调光等级点亮)，从表中可以看出，自动模式下的用电量比全亮模式(80%)下的用电量节省 744 kW·h。

表 2 电表测量值(包括赤柏隧道左幅和右幅)

Tab. 2 Electric meter measured value (including left and right holes of Chibai tunnel)

控制模式	耗电量/(kW·h)	测量时间
自动	2 688	2016-01-12
全亮(80%)	3 432	2016-01-13
时间	3 180	2016-01-14

表 3 为隧道照明监控软件的电量测量值。从表中可以看出，自动模式与全亮模式(80%)相比节省了 742.5 kW·h 的电能，节约了约 54% 的用电量，接近于赤柏隧道现场电表的测量值；与时间模式相比节省了 487.3 kW·h 的电能，节约了约 43% 的用电量。

表 3 软件测量值(包括赤柏隧道右幅)

Tab. 3 Software measured value (including right hole of Chibai tunnel)

控制模式	耗电量/(kW·h)	测量时间
自动	632.8	2016-01-12
时间	1 120.1	2016-01-14
全亮(80%)	1 375.3	2016-01-13

10 结论

根据吉林省通化市赤柏隧道的一些实际情况，

设计并实现了隧道照明智能监控软件。该软件采用图像处理方法实现了隧道内的车辆检测和隧道路面亮度实时测量,采用闭环反馈实现了对隧道照明亮度的有效控制,使整个系统基于环境信息感知和车辆行为感知实现了智能控制和照明节能。根据软件统计数据和电表测量数据可知,隧道照明系统采用自动控制模式与全亮模式和时间控制模式相比,可以大幅度地节约用电量。在能源紧张和照明运营开支居高不下的形势下,本研究所设计的隧道照明智能监控软件能够对高速公路隧道照明系统的设计和实现提供有价值的参考。

参考文献:

References:

- [1] 交通运输部. 2015 年交通运输行业发展统计公报 [R]. 北京: 交通运输部, 2015.
Ministry of Transport. Statistical Bulletin of Transportation Industrial Development in 2015 [R]. Beijing: Ministry of Transport, 2015.
- [2] 杨超, 王志伟. 公路隧道照明节能技术 [J]. 现代隧道技术, 2010, 47 (2): 102-108.
YANG Chao, WANG Zhi-wei. Energy-saving Technology for Highway Tunnel Lighting [J]. Modern Tunnelling Technology, 2010, 47 (2): 102-108.
- [3] 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 Yang, LI Bi-bo, ZHANG Chun-hua, et al. Demonstration Application of Expressway Tunnel LED Lighting Intelligent Control [J]. Mechanical and Electrical Information, 2014 (9): 106-107.
- [4] 储诚赞, 刘玉新, 燕凌. 公路隧道节能方式探究 [J]. 现代隧道技术, 2016, 53 (1): 23-27.
CHU Cheng-zan, LIU Yu-xin, YAN Ling. On the Energy-Saving Mode for Highway Tunnels [J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53 (1): 23-27.
- [5] 肖代全, 申振武, 徐学才. 高速公路隧道口绿化对驾驶员心理的影响 [J]. 公路交通科技, 2016, 33 (6): 101-106.
XIAO Dai-quan, SHEN Zhen-wu, XU Xue-cai. Impact of Virescence at Expressway Tunnel Portal on Driver's Psychology [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33 (6): 101-106.
- [6] 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 (2): 132-138.
WANG Shao-fei, DENG xin, WU Xiao-li. Overview of Lighting Control Techniques in Expressway Tunnels [J]. Technology of Highway and Transport, 2010 (2): 132-138.
- [7] 涂耘, 王少飞, 张琦, 等. “低碳经济”背景下公路隧道照明节能策略 [J]. 现代隧道技术, 2011, 48 (3): 14-21.
TU Yun, WANG Shao-fei, ZHANG Qi, et al. Strategy for Illumination Energy-saving of Highway Tunnels under the Condition of “Low-carbon Economy” [J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48 (3): 14-21.
- [8] 刘社章, 秦大为. 道路照明的亮度测量方法 [J]. 电工技术, 2009, 32 (3): 8-11.
LIU She-zhang, QIN Da-wei. Brightness Testing Method for Road Lighting [J]. Electric Engineering, 2009, 32 (3): 8-11.
- [9] 李本亮, 谷历文. LED 道路照明路面照度测试系统的研制 [J]. 照明工程学报, 2016, 27 (2): 49-53.
LI Ben-liang, GU Li-wen. The Development of LED Street Lamp Pavement Lighting Effects Testing System [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2016, 27 (2): 49-53.
- [10] JTG/T D70/2 - 01—2014, 公路隧道照明设计细则 [S].
JTG/T D70/2 - 01—2014, Guidelines for Design of Lighting of Highway Tunnels [S].
- [11] CABRERA R R, TUYTELAARS T, GOOL L V. Efficient Multi-camera Detection, Tracking, and Identification Using a Shared Set of Haar-features [J]. Computer Vision & Pattern Recognition, 2011, 42 (7): 65-71.
- [12] CASTAÑEDA J N, JELACA V, FRÍAS A, et al. Non-overlapping Multi-camera Detection and Tracking of Vehicles in Tunnel Surveillance [C] //International Conference on Digital Image Computing Techniques and Applications (DICTA 2011). Noosa: IEEE, 2011: 591-596.
- [13] CABRERA R R, TUYTELAARS T, GOOL V L. Efficient Multi-camera Vehicle Detection, Tracking, and Identification in a Tunnel Surveillance Application [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2012, 116 (6): 742-753.
- [14] 张惠玲, 李克平, 邓天民. 视频车辆检测技术中的阈值分割算法研究 [J]. 公路交通科技, 2009, 26 (3): 116-120.
ZHANG Hui-ling, LI Ke-ping, DENG Tian-min. Study on Threshold Segmentation Algorithm in Video Vehicle Measurement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26 (3): 116-120.

(下转第 107 页)

- (1): 60–62.
WU Lei, WEI Zhen, GE Fang-zhen. Memetic Algorithm for Vehicle Routing Problem with Time Windows [J]. Application Research of Computers, 2012, 29 (1): 60–62.
- [12] 钟石泉, 贺国光. 有时间窗约束车辆调度优化的一种禁忌算法 [J]. 系统工程理论方法应用, 2005, 14 (6): 522–526.
ZHONG Shi-quan, HE Guo-guang. A Tabu Search Algorithm for Vehicle Scheduling Problem with Time Windows [J]. Systems Engineering – Theory Methodology Application, 2005, 14 (6): 522–526.
- [13] 孟祥虎, 胡蓉, 钱斌. 求解带时间窗车辆路径问题的有效混合 PBIL 算法 [J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34 (10): 2701–2709.
MENG Xiang-hu, HU Rong, QIAN Bin. Effective Hybrid Population-based Incremental Learning Algorithm for Vehicle Routing Problem with Time windows [J]. Systems Engineering – Theory & Practice, 2014, 34 (10): 2701–2709.
- [14] 吴虎胜, 张凤鸣, 吴庐山. 一种新的群体智能算法——狼群算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35 (11): 2430–2438.
WU Hu-sheng, ZHANG Feng-ming, WU Lu-shan. New Swarm Intelligence Algorithm: Wolf Pack Algorithm [J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35 (11): 2430–2438.
- [15] 吴虎胜, 张凤鸣, 李浩, 等. 求解 TSP 问题的离散狼群算法 [J]. 控制与决策, 2015, 30 (10): 1861–1867.
WU Hu-sheng, ZHANG Feng-ming, LI Hao, et al. Discrete Wolf Pack Algorithm for Traveling Salesman Problem [J]. Control and Decision, 2015, 30 (10): 1861–1867.
- [16] 林丹, 丑英哲, 王萍. 求解车辆路径问题的一种遗传算法 [J]. 系统工程理论方法应用, 2006, 15 (6): 528–533.
LIN Dan, CHOU Ying-zhe, WANG Ping. A Genetic Algorithm for the Vehicle Routing Problems [J]. Systems Engineering – Theory Methodology Applications, 2006, 15 (6): 528–533.
- [17] 张钦, 李辉. 带有时间窗约束的车辆路径问题的一种改进遗传算法 [J]. 系统管理学报, 2010, 19 (5): 589–592.
ZHANG Qin, LI Hui. An Improving Genetic Algorithm for Vehicle Routing Problems with Time Windows [J]. Journal of Systems & Management, 2010, 19 (5): 589–592.
- [18] 张超群, 郑建国, 王翔. 蜂群算法研究综述 [J]. 计算机应用研究, 2011, 28 (9): 3201–3205.
ZHANG Chao-qun, ZHENG Jian-guo, WANG Xiang. Overview of Research on Bee Colony Algorithms [J]. Application Research of Computers, 2011, 28 (9): 3201–3205.
- [19] 秦家娇, 张勇, 毛剑琳, 等. 基于粒子碰撞的粒子群算法求解带时间窗车辆调度问题 [J]. 计算机应用研究, 2012, 29 (4): 1253–1255.
QIN Jia-jiao, ZHANG Yong, MAO Jian-lin, et al. Based on Particles Collision PSO for Vehicle Routing Problem with Time Windows [J]. Application Research of Computers, 2012, 29 (4): 1253–1255.
- +++++
- (上接第99页)
- [15] 刘振华, 黄磊, 刘昌平. 一种基于视频图像处理的车辆违章检测算法 [J]. 公路交通科技, 2012, 29 (2): 106–114.
LIU Zhen-hua, HUANG Lei, LIU Chang-ping. A Vehicle Violation Detection Algorithm Based on Video Image Processing [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29 (2): 106–114.
- [16] 黄鹏程. 高速公路隧道监控系统应用软件的设计与实现 [J]. 交通建设与管理, 2014 (14): 294–296.
HUANG Peng-cheng. Design and Implement of Application Software of Highway Road Tunnel System [J]. Transportation Construction and Management, 2014 (14): 294–296.
- [17] 田丰年, 鲁植雄, 赵兰英, 等. 基于 PID 神经网络算法的新型电控液压力转向系统 [J]. 公路交通科技, 2010, 27 (8): 136–142.
TIAN Feng-nian, LU Zhi-xiong, ZHAO Lan-ying, et al. A New Electro-controlled Hydraulic Power Steering System Based on PIDNN Algorithm [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (8): 136–142.
- [18] 陈翔, 张林燕, 白月飞, 等. 模糊 PID 控制的电动汽车再生制动系统变换器的研究 [J]. 公路交通科技, 2008, 25 (7): 141–145, 158.
CHEN Xiang, ZHANG Lin-yan, BAI Yue-fei, et al. Study of Fuzzy PID Control for Regenerative Braking Converter of Electric Vehicle [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (7): 141–145, 158.
- [19] 连静, 王珂, 杨兆升. 多尺度图像边缘检测技术在车辆识别中的应用 [J]. 公路交通科技, 2007, 24 (9): 87–91.
LIAN Jing, WANG Ke, YANG Zhao-sheng. Study of Fuzzy PID Control for Regenerative Braking Converter of Electric Vehicle [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (9): 87–91.