

隧道多源模糊自适应智能照明网络设计与实现

杨云¹, 刘晨¹, 丁鹏鸽¹, 韩浩壮¹, 段理²

(1. 长安大学 信息工程学院, 西安 710018; 2. 长安大学 材料科学与工程学院, 西安 710018)

摘要:为解决公路隧道中照明系统的光强分布不对称和调光系统高延时问题,在分析公路隧道入口、过渡、中间和出口段光强分布特征,以改进调光系统延时为主要目的基础上,提出和实现了基于CAN总线多节点组网的多源模糊控制智能隧道照明系统。本文所实现的网络系统改进了传统隧道照明系统灯光不可自适应车流量调节的不足,具体设计了在隧道入口和出口段引入车流和环境光照等因素的多源调光网络节点,在隧道过渡和中间段的考虑驾驶员视觉刺激造成视盲的问题实现车流跟随实时模糊调光网络节点,在隧道全段车流监测的网络节点协调仲裁后,实现实时智能调光自适应照明。试验部分在原型隧道系统上成功验证本文所设计多源自适应智能隧道调光系统,可实现车来灯亮、车走灯灭,车多强亮、车少弱亮,所设计系统在保障车辆安全通行隧道基础上,可在一定程度上降低电能消耗,有很强的工程应用价值。

关键词:隧道照明; 多源模糊控制; 自适应调光; CAN总线

中图分类号:U453.7

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2023)增2-0955-08

Design and Implementation of Tunnel Multi-Source Fuzzy Adaptive Intelligent Lighting Network

Yang Yun¹, Liu Chen¹, Ding Pengge¹, Han Haozhuang¹, Duan Li²

(1. School of Information and Engineering, Chang'an University, Xian 710018, P. R. China;

2. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xian 710018, P. R. China)

Abstract: In order to solve the problems of asymmetric light intensity distribution of lighting system and high delay of dimming system in highway tunnel, based on the analysis of light intensity distribution characteristics at the entrance, transition, middle and exit sections of highway tunnel, and with the main purpose of improving the delay of dimming system, a multi-source fuzzy control intelligent tunnel lighting system based on CAN bus multi node networking is proposed and implemented. The network system implemented in this paper improves the deficiency of the traditional tunnel lighting system that the lighting cannot adapt to the traffic flow regulation. A multi-source dimming network node is specifically designed to introduce the traffic flow and ambient light factors into the tunnel entrance and exit sections. In the transition and middle sections of the tunnel, the problem of visual blindness caused by the driver's visual stimulation is considered to realize the real-time fuzzy dimming network node for traffic flow following. The real-time intelligent dimming adaptive lighting is realized after the coordination and arbitration of the network nodes for the whole section of the tunnel traffic flow monitoring. In the experimental part, the multi-source adaptive intelligent tunnel dimming system designed in this paper has been successfully verified on the prototype tunnel system, which can realize that the vehicle light comes on, the vehicle light goes off, the vehicle light is more stronger, and the vehicle light is less weak. On the basis of ensuring the safe passage of vehicles through the tunnel, the designed system can reduce the power consumption to a certain extent, and has strong engineering application value.

Keywords: tunnel lighting; multi-source fuzzy control; adaptive dimming; CAN bus

收稿日期:2023-03-16(修改稿)

作者简介:杨云(1973—),女,陕西西安人,博士,副教授,主要从事嵌入式实时系统,智能交通应用等领域的教学与科研工作。E-mail: yangyun@chd.edu.cn

基金项目:陕西省自然科学基金重点研发计划(2021GY-255)

0 引言

随着国民经济的发展,为实现路网延伸便利、中远距离贯通互连,修建隧道成为公路交通建设中的关键举措。隧道因其特殊环境和光强分布非对称性,使得当驾驶车辆经过隧道时,驾驶员会产生瞬时视盲^[1-4],存在一定的安全隐患。同时,经研究调查发现,目前隧道所铺设的照明系统,每年消耗的电费约占隧道年度支出的 80%,存在严重的资源浪费^[5]。目前,大部分隧道仍然在使用传统的照明方式^[6-7]。传统的隧道照明系统,由于其灯光不可调性^[8],难以解决隧道内外光线差所导致的视盲现象,存在一定的安全隐患,同时会导致隧道内部灯光长时间处于过度照明状态消耗能源^[9-12]。部分智能隧道照明系统的提出,虽然可以实现灯光智能调节^[13],在一定程度上改善视盲现象,但是系统延迟较大,需要一定缓冲段,无法达到快速响应的目的。大部分隧道依然采用 RS485 总线作为传输协议,无法满足长隧道高速数据传输,同时会因为故障节点拒绝服务而造成的网络传输崩溃安全问题。CAN 总线由于具有特殊的错误处理和检错机制优势,能够提供强实时高安全的网络传输环境。

本文创新的对公路隧道照明系统,引入 CAN 总线数据传输技术与模糊控制算法,构建基于

CAN 总线的多源模糊自适应智能照明测量与控制网络系统,既可以解决传统隧道照明系统中的光强不均匀和车流响应高延时困难,也能有效解决公路隧道能源过度消耗问题^[14-18]。所设计系统对隧道照明精准分段,在入口和出口段,部署地感线圈和红外对管等车辆

传感器,对进入和离开隧道车辆进行实时检测^[19],同时布设光照等环境传感器,采集多源数据,实现当有车辆经过时灯光亮起,车辆离开时灯光熄灭。在隧道内部各分段,设计模糊控制算法融合多源传感器数据,自适应实时调节隧道照明系统,解决驾驶人员视神经系统因照明而导致视盲安全困扰^[20]。所有功能模块均接入 CAN 总线网络,从根本上解决 RS485 总线作为传输协议时无法满足长隧道高速数据传输的困难,同时网络也可有效避免新功能节点接入和故障节点拒绝服务而造成的网络传输崩溃安全问题。

1 系统总体设计方案

1.1 总体方案

隧道照明系统总体设计构架如图 1 所示。系统采用主从网络结构,主机基于 32 位单片机设计,从机基于 8 位单片机设计,其中从机 1 实现隧道外部光照亮度采集,将光照亮度通过 CAN 总线发送到上位机;从机 2 实现车辆信息采集,将车辆数据

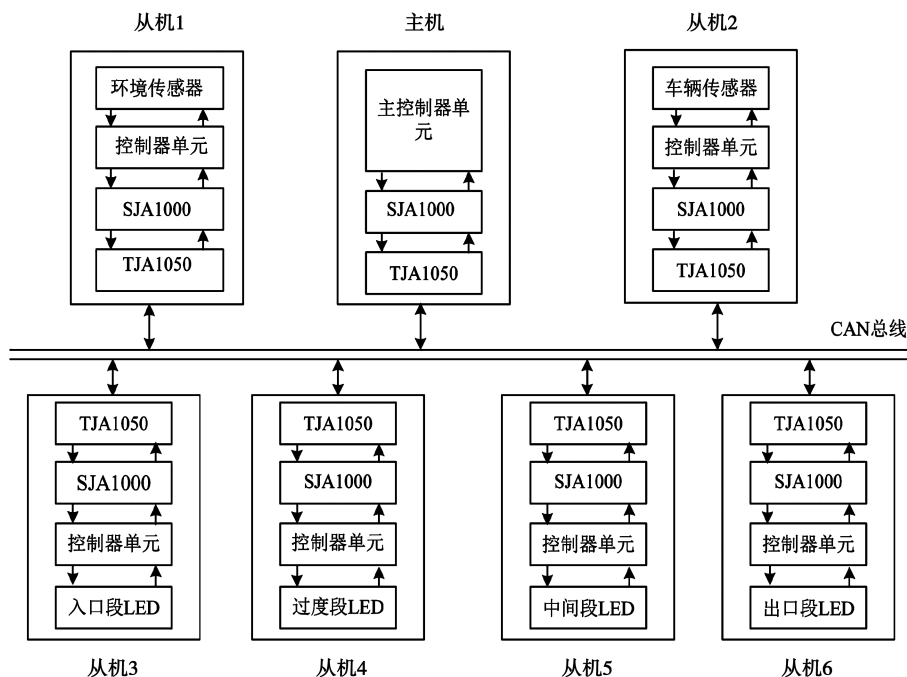


图 1 隧道照明系统构架图

Fig. 1 Tunnel lighting system structure diagram

通过 CAN 总线发送到主机。主机将车辆和环境等多源传感器数据输入到模糊控制算法函数,判断是否需要调节隧道灯光亮度,如果需要调节灯光亮度,则主机将调节控制命令与调节参考自然光强度,通过 CAN 总线网络传输,分别发送至隧道各段的从机 3、从机 4、从机 5 和从机 6,各段从机分别根据《公路隧道照明设计细则》的国标准则,实时调节相应路段的照明亮度。

1.2 网络物理层

本系统主机采用 32 单片机实现电路物理层设计,从机系统采用 51 单片机实现,传感器模块:地感线圈,红外对管传感器,光照强度传感器,环境测量传感器。照明系统灯光控制系统,采用 100 级调光的调光模块作为驱动电路。其中集成传感器模块和灯光控制模块数据传输方式均为 RS485 型,为实现 CAN 组网,特设计 RS485 转 CAN 转换器模块,实现 CAN 网络物理层的 485 与 CAN 信号全双工实时转换。

1.3 网络拓扑结构

隧道照明系统网络拓扑结构如图 2 所示,包含了信息采集系统(光照、车辆和环境信息),灯光控制系统,信息管理系统(兼容现有隧道管理系统)。

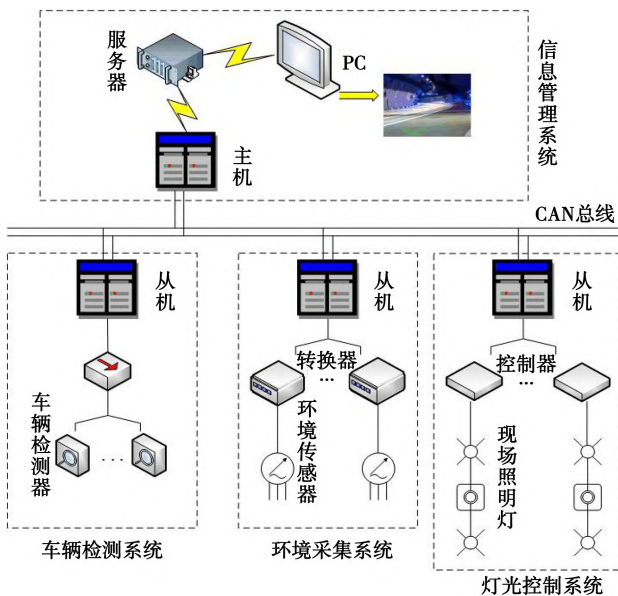


图 2 隧道照明系统网络拓扑结构图

Fig. 2 Network topology of the tunnel lighting system

2 智能照明算法设计

2.1 隧道分段照明算法

根据《公路隧道照明设计细则》^[14]的规定,如

果所建隧道长度大于百米的话,为了保证行车安全,需要将整个隧道分为入口段、过渡段、中间段、出口段等几个部分。不同路段照明亮度要求不同,隧道分段亮度梯度图如图 3 所示。隧道内部照明亮度应符合从入口段开始逐级递减,中间段照明维持基本照明亮度,在出口段再逐级递增的标准。

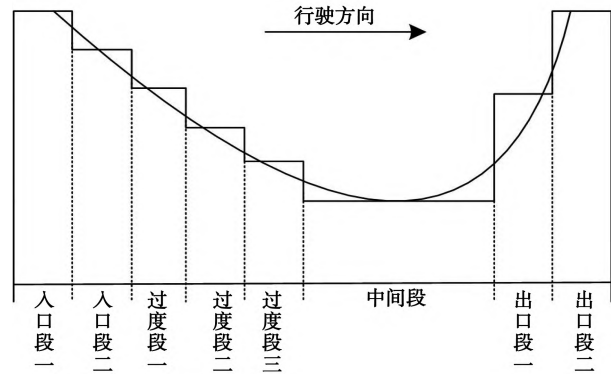


图 3 隧道分段亮度梯度图

Fig. 3 Sectional lighting gradient diagram of tunnel

(1) 入口段照明算法

对于隧道长度在 500 m 以上的隧道,需将隧道的入口段分为两段,分别为 TH_1 、 TH_2 。隧道入口段 D_{th1} 、 D_{th2} 的长度可以利用公式(1)进行相应的计算。其中 D_s 为停车视距, h 为隧道净空高度。

$$D_{th1} = D_{th2} = \frac{1}{2} \left(1.154D_s - \frac{h - 1.5}{\tan 10^\circ} \right) \quad (1)$$

TH_1 、 TH_2 段的隧道照明亮度 L_{th1} 、 L_{th2} 分别由公式(2)、公式(3)进行相应计算。其中, k 为照明增减系数, L 为隧道外部自然环境光照亮度^[16]。

$$L_{th1} = k \times L_{20}(s) \quad (2)$$

$$L_{th1} = 0.5 \times k \times L_{20}(s) \quad (3)$$

(2) 过渡段照明算法

根据过渡段亮度递减的规定,可以将隧道内部过渡段设置为 3 个阶段,分别用 TR_1 、 TR_2 、 TR_3 表示,其对应隧道长度 D_{in1} 、 D_{in2} 、 D_{in3} 由公式(4)、(5)、(6)确定。

$$D_{in1} = \frac{D_{th1} + D_{th2}}{3} + \frac{v}{1.8} \quad (4)$$

$$D_{in2} = \frac{2v}{1.8} \quad (5)$$

$$D_{in3} = \frac{3v}{1.8} \quad (6)$$

其中 TR_1 、 TR_2 、 TR_3 段的隧道照明亮度

L_{tr1} 、 L_{tr2} 、 L_{tr3} 分别由公式(7)、(8)、(9)确定。

$$L_{tr1} = 0.15 \times L_{th1} \quad (7)$$

$$L_{tr2} = 0.05 \times L_{th1} \quad (8)$$

$$L_{tr3} = 0.02 \times L_{th1} \quad (9)$$

(3) 中间段照明算法

根据相关规定,隧道内部安全行车时速不能超过 80 km/h,且隧道内部中间段照明亮度应为 $L_{in} = 2.5 \text{ cd/m}^2$ 。如果中间段长度行车时间超过 135 s 时,需要设置为两段中间照明段,在 30 s 之内的行车路段设为第一段中间照明段,其照明亮度 $L_{in1} = 2.5 \text{ cd/m}^2$,30s 之后的行车路段设为第二段中间照明段,第二段的亮度取第一段照明亮度的 80%,即 $L_{in2} = 0.8 \times L_{in1}$ 。

(4) 出口段照明算法

在距离隧道出口 30 m 的路段设定为出口段,如果隧道长度过长可设置两段出口段量。出口段照明亮度可参照入口段的第一段照明亮度设定,且最低亮度不能小于中间段亮度的 5 倍,即 $L_{ex} = 5 \times L_{in}$ 。

2.2 停车视距方案

停车视距在隧道照明系统设计中是关键因素之一,停车视距的设定决定了驾驶人员在看到障碍物到车辆紧急制动所预留的反应时间,所以很大程度会影响到驾驶人员的人身安全。停车视距模型在隧道照明系统中,主要用于计算隧道入口段长度。停车视距模型采用 GB7258—2017《机动车运行安全技术条件》中考虑车辆制动系数(气压制动小于等于 0.6 s,液压制动小于等于 0.3 s),制动上升时间(小于等于 0.6 s),修正后的停车视距为:

$$S = \frac{v_0 t}{3.6} + \frac{v_0}{12} + \frac{v_0^2}{25.92 a_{\max}} - 0.015 a_{\max} \quad (10)$$

式中: S 为停车视距, m; v_0 为初始速度, km/h; t 为驾驶员反应时间, s; a_{\max} 为最大减速度, $\frac{m}{s^2}$ 。

3 自适应模糊控制方案

3.1 模糊系统构成

隧道照明系统亮度调节需要根据自然光照强度、车流量等信息进行调节。面对随时变化的自然光照强度和不易控制的车流量,采用模糊控制算法可以有效地对隧道灯光进行自适应调节。本次实验将检测到的自然光照强度与车流量作为模糊控

制的输入调节参数,对传统模糊 PID 控制优化,设定合适模糊集,制定模糊规则,实现基于自然光照强度与车辆信息结合自适应调节隧道光照亮度。自适应模糊 PID 控制的流程框图如图 4 所示,主要由模糊化、确定模糊规则、反模糊化等几个部分共同组成^[17]。

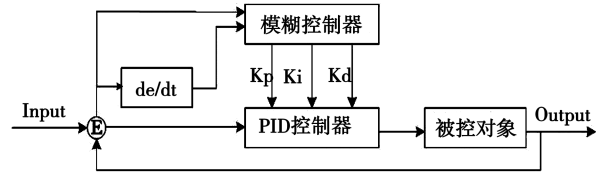


图 4 模糊自适应 PID 框图

Fig. 4 The fuzzy adaptive PID diagram

3.2 隧道灯光模糊控制规则设计

为了提高系统的精确程度,将输入参数自然光照强度与车流量信息进行量化,取 $[-3, 3]$ 为量化基本论域^[18],即 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$,在基本论域内可以把每个因子看作一个小的集合,那么每个小集合就代表了一个单独的模糊集,而且每个因子都有一个特殊的隶属度函数,本文选择三角形隶属度函数作为模型,如公式(11)所示。

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b; \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c; \\ 0 & x \geq c; \end{cases} \quad (11)$$

其中 a 和 d 确定三角形的“脚”, b 确定三角形的“峰”。

将隧道外光照强度作为基准光照强度,设定基准光照强度参数为 C_1 ,将隧道内部灯光亮度作为实际光照亮度设为 C_2 。设定基准车流量参数为 W_1 ,将 W_1 取值为零,将车辆检测系统检测到的车流量作为实际车流量设为 W_2 ,所以光照强度误差为 $C = C_1 - C_2$,车流量误差为 $W = W_1 - W_2$ 。将模糊控制器的输入、输出变量模糊化为 7 个模糊状态,将子集取为 $\{\text{负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}\}$,即 $\{\text{NB, NM, NS, O, PS, PM, PB}\}$ ^[19]。为了使本系统更加符合实际应用,满足光照亮度需求,使得系统鲁棒性更强、安全性更高,实验所用模糊控制规则设计细则如表 1 所示。其中 E 表示误差, EC 表示误差变化率, U 表示输出变量。

表 1 模糊控制规则表

Table 1 Fuzzy control rule table

U	E						
	NB	NM	NS	O	PS	PM	PB
EC	NB	NB	NM	NM	NS	NS	O
	NM	NB	NM	NS	NS	O	PS
	NS	NM	NM	NS	O	PS	PS
	O	NM	NS	NS	O	PS	PM
	PS	NS	NS	O	PS	PS	PM
	PM	NS	O	PS	PS	PM	PB
	PB	O	PS	PS	PM	PM	PB

3.3 反模糊化设计

本文采取重心法反模糊化,利用隶属度函数曲线与坐标轴围成的面积,求出其中心点作为输出的确定值来进行反模糊化。计算公式如式(12)所示,其中 $\mu_N(x)$ 为隶属度函数。

$$u = \frac{\int x \mu_N(x) dx}{\int \mu_N(x) dx} \quad (12)$$

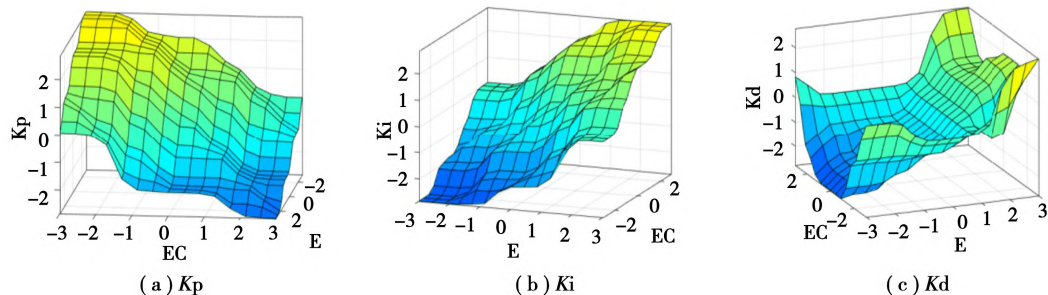


图 5 调节系数曲面图

Fig. 5 Coefficient of regulation surface diagram

4 实时传输网络设计

4.1 CAN 总线与 485 总线对比

CAN(Controller Area Network) 控制器局域网络,即 CAN 总线,是一种支持实时分布式控制的串行通信网络。目前 CAN2.0B 协议分为物理层和数据链路层,其中数据链路层又可分为逻辑链路控制层和介质访问控制层。CAN 总线在物理层以传输线之间的差分电压来表示逻辑 1 和 0 互补状态,在数据链路层定义了 11 位标准和 29 位扩展两种帧格式,报文可以发送数据、远程、错误和过载四种类型的帧,主要的标准数据帧格式如下图 7 所示。

3.4 模糊系统仿真及优化对比

模糊 PID 中 K_p 、 K_i 、 K_d 是影响调节速度、调节稳态时间、修正误差的关键原因。其中 K_p 是比例调节系数, K_i 是积分调节系数, K_d 是微分调节系数。利用 Matlab 对模糊 PID 系统所建立模糊控制规则表编辑规则仿真,可以得出如图 5 所示 K_p 、 K_i 、 K_d 调节系数曲面图。

对比优化后模糊 PID 相较于传统 PID 的优点,分别对传统 PID 和优化后模糊 PID 系统建立模糊模型,添加模糊规则然后进行仿真可以得到如图 6 所示输出调节图像。图 6 中 (a) 为传统 PID 调节图像,图 6 中 (b) 为优化后模糊 PID 调节图像。其中图像纵坐标为调节日标值(设定目标值为 100),横坐标为调节时间(ns)。可以发现同样调节日标值使用优化后模糊 PID 系统相较于传统 PID 系统在响应时间上更快速,传统 PID 系统具有一定超调量,优化后模糊 PID 系统超调量几乎为零。所以优化后模糊 PID 系统可以更好的适应隧道照明的稳定、快速响应要求。

相对于传统的隧道照明控制系统组网技术 RS485,CAN 总线有组网灵活、传输速度快、和实时通信高可靠的显著优势。首先,网络节点上 CAN 总线突破了 485 总线最多 128 个网络节点的限制,理论上可支持无限多个网络节点,因此,实际工程中可根据隧道实际长度灵活增减网络节点。其次,相对于 485 的 9 600 bps 网络传输速度,CAN 网络通信在 1 km 内达到 1 Mbps 高速传输,超过 1 km 可到 1 kbps 以上数据传输效率,而 485 总线在距离可打超过 100 m 后可靠通信速率仅为 1 200 bps。最后,由于 485 总线受限于开发年代,需要自定义网络传输协议,无法适应当前隧道施工的工程体量

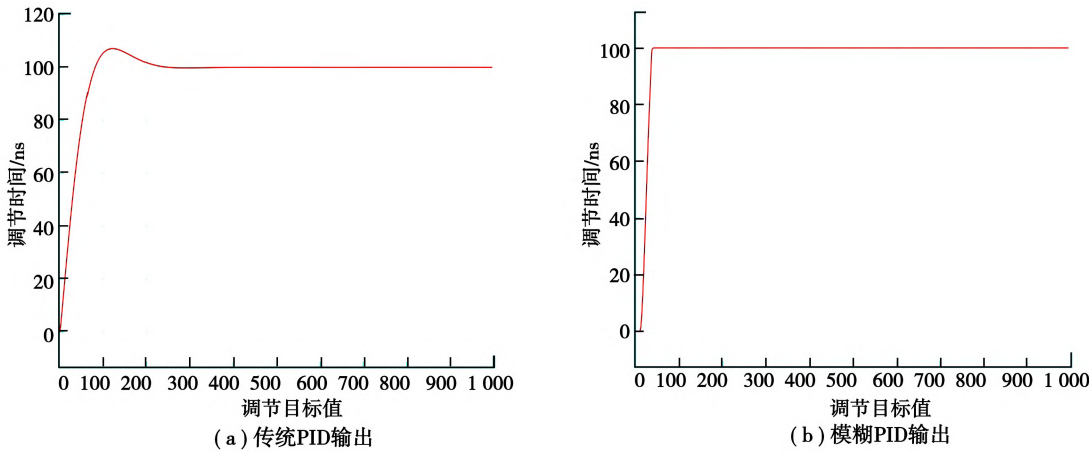


图 6 输出调节图像
Fig. 6 Output Adjustment Diagram

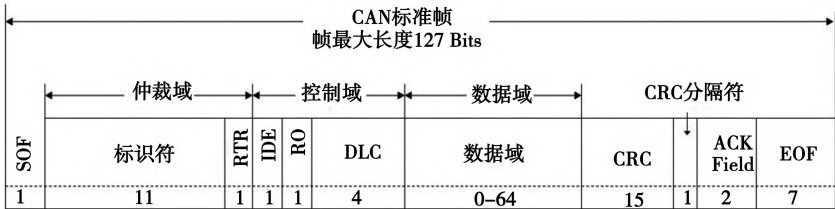


图 7 CAN 总线标准帧格式
Fig. 7 CAN Bus standard frame format

和速度的要求,而 CAN 总线支持载波侦听多路访问(CSMA/AMP)协议,节点在发送消息前,必须侦听总线是否空闲,如果空闲则立即发送,否则等待,当消息碰撞时,按照优先级高的节点优先获得网络控制权,可将网络时延控制在有限时间范围内。同时,CAN 总线有特殊的错误处理和检错机制,当总线中某一个节点出现错误,CAN 总线不会受到影响,但 485 总线则会整个总线瘫痪。因此,本文提出对多源传感器隧道照明控制系统采用 CAN 组网,可实现测量、传输和控制的全方位解决方案,同时引入模糊控制技术,提高了照明系统调光算法的智慧程度。

4.2 CAN 通信模块设计

CAN 通信模块包含 CAN 收发器和 CAN 控制器两个主要的组成部分,如图 8 所示。CAN 控制器的功能是将用于通信的报文信息转换为规范型 CAN 数据帧,并以二进制的形式完成信息传输。CAN 收发器的功能是将 CAN 控制器的逻辑电平转换为可以在总线上传输的差分电平,完成与总线之间的通信。

本论文中选用 SJA1000 芯片作为独立的控制器芯片,TJA1050 作为总线收发器芯片。SJA1000

对比于传统控制器芯片增加了增强型工作模式,不仅支持 CAN 2.0A 协议还同时支持 CAN 2.0B 协议。在增强模式下可以自检是否正常挂于总线上,同时拥有更加灵活的滤波设置。TJA1050 作为后续开发的高速 CAN 控制器,支持 110 个节点的接入,并且使用中继电器可以继续扩充节点,其速度可达 1 Mbps。

4.3 CAN 总线网络结构设计

在隧道中由于特殊的工况条件,在总线设计过程中要充分考虑总线工作的可靠性。可以采用环形布线的方式布置总线,如图 9 所示。布置环形 CAN 总线的优点在于,如果总线上由于某一个节点发生问题导致总线堵塞或者断开,通信信号可从总线另一个方向进行信息传输,不会影响信号传输,可以在一定程度上提高总线系统的数据传输可靠性。

5 试验结果分析与讨论

5.1 公路隧道原型系统试验结果

为验证本文所设计照明系统的功能,考虑公路隧道照明、光源、配光曲线以及隧道内光线的墙面和路面反射等因素,依据实际隧道中所用 LED 光

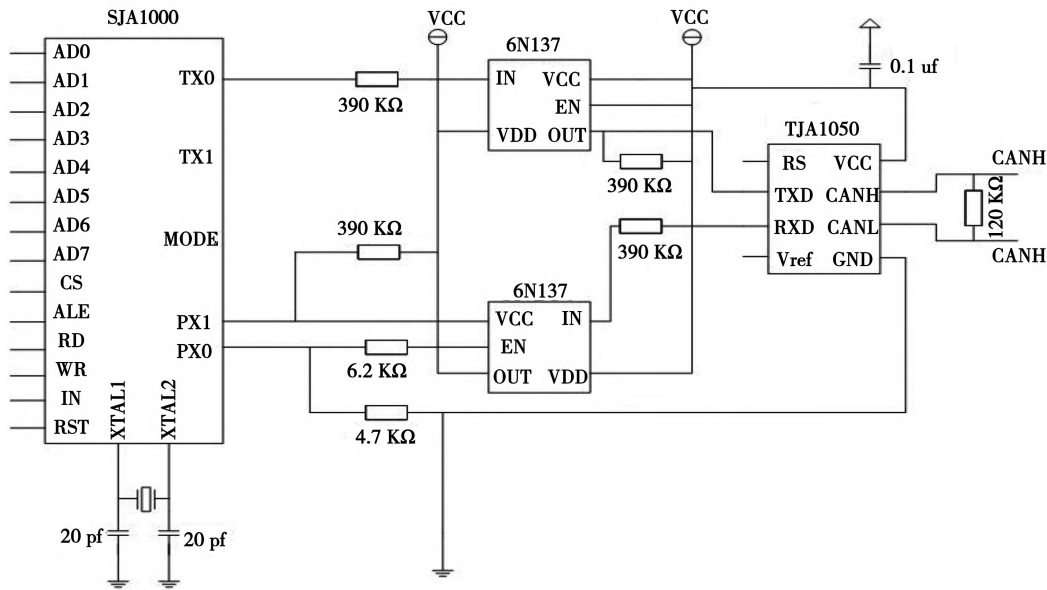


图 8 CAN 通信模块电路图

Fig. 8 CAN communication module circuit diagram

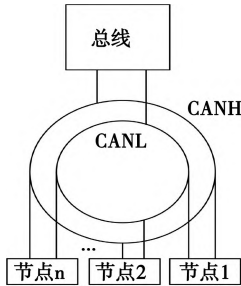


图 9 CAN 总线环形结构图

Fig. 9 CAN Bus network structure diagram

源的无级调光规则,在实验室环境构建公路隧道原型系统如图 10 所示。

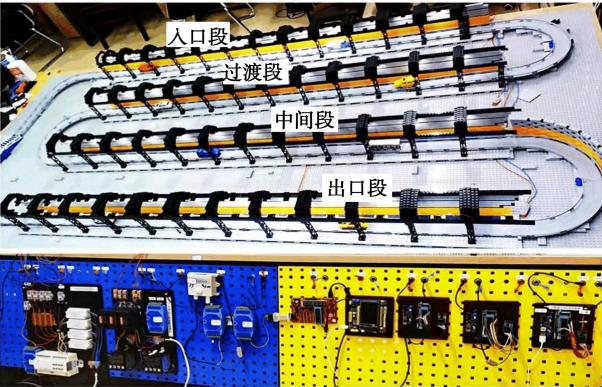


图 10 公路隧道照明原型系统

Fig. 10 Tunnel lighting demo system

在实验室环境下对隧道原型系统模拟节能分析,选取 8 点至 18 点为白天测试时间段,分别测试日均通车 10 000 辆、5 000 辆、3 000 辆按照光照曲

线进行节能分析,可得如图 11 所示隧道原型系统节能分析图。根据图 11 所示可以看到,在日均通车数量越小的情况下节能效果约明显,在 10 点至 14 点时间段节能效果明显。

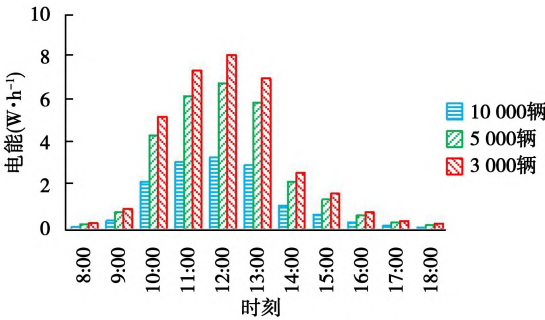


图 11 隧道原型系统节能分析图

Fig. 11 Energy saving analysis diagram of tunnel prototype system

5.2 实际隧道案例分析

以陕西省秦岭山区终南山隧道为实际案例,验证本文所设计系统算法可行与控制效果。

(1)环境光照条件分析绘制终南山地区的 24 h 光照曲线如图 12 所示。

(2)隧道车流分析

日均车流量为 17 000 辆,限定车速 80 km/h,隧道全长 18.02 km,限制高度 5 m,停车视距为 110 m。因此,可计算出入口段 $TH_1 = TH_2$ 长度约为 53.5 m;可设置三段过渡段,则过渡段一 TR_1 的长度约为 80 m,过渡段二 TR_2 的长度约为 89 m,过渡

段三 TR_3 的长度约为 133 m; 设置两段出口段, 且每段长度为 30 m; 中间段长度为 17 551 m, 且车辆所需行驶时间远远大于 135 s, 需将中间段设计为两段, 其中中间段一 L_{in1} 长度约为 667 m, 中间段二 L_{in2} 长度约为 16 884 m。

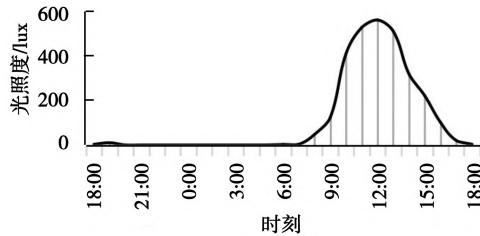


图 12 光照曲线图

Fig. 12 Illumination curve

(3) 节能效果分析

按照 1.42 折算比计算, 在日均车流量 17 000 辆的情况下, 从早上 6 到晚上 8 点 14 h 内通行车辆数目大约为 9 975 辆, 晚上 8 点到次日凌晨 6 点 10 h 内通行车辆数目大约为 7 025 辆。

在各个分段路段设置车辆检测器, 入口段两段按照 80 km/h 计算, 经行时间分别为 2.48 s, 14 h 通车数量 9 975 辆, $14 \times 3600 \div 9975 \approx 5.05$ s, 也就是平均 5.05 s 检测到一辆车, 所以在入口段部分比传统固定开启式照明大约节约 51% 的能源消耗。

采用同样的方法计算过渡段, 可得到过渡段一的通车时间为 3.6 s, 过渡段二的通车时间为 4 s, 过渡段三的通车时间为 5.98 s, 因此过渡段平均节约大概 16.5% 的能源消耗。

出口段通车时间为 1.35 s, 可节约 73% 的能源消耗。因为中间段长度较长, 在条件允许情况下间隔 100 m 布设车辆检测器, 可以节约大约 10.9% 的能源消耗。结合入口段、过渡段、中间段、出口段数据分析发现, 在隧道整体中能源消耗可平均节约 16.2%。隧道分段节能效率如图 13 所示。

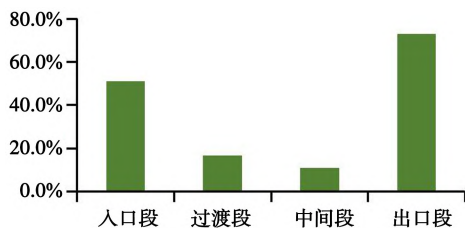


图 13 隧道分段节能效率分析图

Fig. 13 Analysis chart of energy saving efficiency of tunnel sections

6 结论

本文设计与实现的公路隧道智能模糊调光系统, 通过 CAN 总线组网实现分布式处理, 通过多路传感器采集车流量以及隧道外部光照强度, 利用模糊控制算法实时调节灯光亮度, 可以实现隧道灯光独立调控、分级调控, 系统准确检测、快速响应、智能调控。适用于短隧道、长隧道、特长隧道照明调节, 在长隧道及特长隧道中节能效果优于短隧道, 但是需要设置多处车辆检测节点, 增加了系统成本, 同时布设车辆检测节点复杂。考虑由于系统硬件本身存在一定延迟效果, 目前调光效果并未达到最佳, 升级系统中将进一步融合视频传感器数据, 优化系统性能。未来研究中, 可引入光源颜色对驾驶员通行隧道时的视觉刺激效应, 研究视觉滤波理论对系统调光控制策略性能的优化。

参考文献 (References)

- [1] 郭俊凯. 公路隧道照明精确检测与智能控制系统研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(增2): 76-81.
- [2] 王兆廷. 一种安全节能公路隧道照明灯具布设方法[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(增2): 762-770.
- [3] 朱合华, 邓越, 沈奕. 公路隧道光环境全寿命周期绿色指标应用案例分析[J]. 中国公路学报, 2022, 35(1): 13-22.
- [4] 宋白桦. 智慧型公路隧道照明节能控制技术的应用分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2016, 12(5): 230-236.
- [5] 郭晓杰, 方春平. 公路隧道照明的自适应模糊神经网络研究. 四川建筑, 2017, 37(5): 86-88.
- [6] 杨翠, 王少飞, 胡国辉, 等. 基于物联网技术的智慧型公路隧道照明系[J]. 公路, 2015, 60(5): 153-157.
- [7] 刘刚, 朱莉, 蒋贵川. 基于 KNX 技术的高速公路隧道智慧照明系统[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(增1): 281-287.
- [8] 杜冠峰, 秦会斌. 基于车辆感知和模糊 PID 的隧道照明控制系统[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(2): 95-197.
- [9] Lu Y, Wang J B, Xiao J. Design and implementayion of LED lighting intelligent control control system for [J]. InternationalL journal of Distributed Sensor Networks, 2020, 6(5): 67-75.
- [10] Wang Y Q, Cui Y W, Chen F. An "Illumination Moving with the Vehicle" intelligent control system of road tunnel lighting [J]. Sustainability, 2020, 12(18): 128-137.

(下转第 970 页)

(2)平台实现自动预警,平台收到报警信号后将根据报警器的位置计算出其距离最近摄像机,调取现场监控,管理人员在确认现场情况后,判断是否采取应急联动方案。通过自动预警和应急联动机制,提高隧道的应急响应速度,缩短反应时间,尽可能降低事故带来的危害。

(3)平台通过信息化手段对设备实现可视化监管,能够实时掌握隧道内设备运行的整体情况并对相应的设备进行远程控制,从而为隧道内设备的巡检、养护以及指挥决策提供可靠、准确的信息支持,为隧道的安全运营提供了有力保障。

目前对于热力隧道的研究较为匮乏,缺少相关的规范标准,平台设定的参数阈值只能借鉴其它隧道的标准规范执行。随着热力隧道的发展,通过对隧道运营进行大数据分析,可以更合理的设置隧道内的环境参数阈值,从而为之后隧道的运营以及其它热力隧道的运营提供支撑。

参考文献(References)

- [1] 吕军. 论当前高速公路隧道运营安全管理现状[J]. 云南水力发电, 2022, 38(3): 82-86.
- [2] 吴森阳, 胡学兵. 公路隧道运营安全等级评估研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(增1): 363-370.
- [3] 曾磊, 王少飞, 卢辉. 高速公路长大隧道防火减灾与应急管理[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(增1): 1584-1590, 1625.
- [4] 陈涛. 隧道及地铁工程预警控制平台建设[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(6): 42-52.
- [5] 左自波, 龚剑, 吴小建, 等. 地下工程施工和运营期监测的研究与应用进展[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(增1): 294-305.
- [6] 张俊儒, 燕波, 龚彦峰, 等. 隧道工程智能监测及信息管理系统研究现状与展望[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(2): 567-579.
- [7] 王丽华, 仇玉良, 姚红志, 等. 隧道监测信息管理与预警系统的研发及应用[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(6): 1287-1291, 1310.
- [8] 刘攀, 邓博. 新一代公路(道路)隧道机电设备综合管控系统设计[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(增1): 478-485.
- [9] 李苗华, 谭平玉, 戴剑军, 等. 智慧隧道一体化管控平台的设计与实现[J]. 湖南交通科技, 2021, 47(2): 16-20, 24.
- [10] 罗婷, 贾彦党. 甘肃省高速公路智慧隧道综合管控系统探析[J]. 科技与创新, 2022(5): 13-16, 22.
- [11] 杨轩. 隧道安全智能监测与联动管理系统工程方案探析[J]. 中国交通信息化, 2022(4): 124-128.
- [12] 中交第一公路工程局有限公司. 公路隧道施工技术规范(JTG F60—2009)[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [13] 中华人民共和国交通运输部. 公路隧道设计规范 第二册: 交通工程与附属设施(JTG D70/2—2014)[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [11] Zhao Y, Dong L L, Qin G, et al. The effect of segmented lighting on tunnel lighting energy-saving[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 189: 19-28.
- [12] 张伟刚, 瞿少成, 秦天柱, 等. 高速公路隧道照明节能模糊控制系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(12): 2049-2055.
- [13] 侯杏娜, 陈寿宏, 吕健富. 基于 NRF24L01 的隧道灯控系统[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(1): 108-111.
- [14] 招商局重庆交通科研设计院有限公司. 公路隧道照明设计细则(JTGTD702-01-2014)[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [15] 于建游, 刘志忠. 延崇高速金家庄特长螺旋隧道智能照明控制系统的设计[J]. 照明工程学报, 2021, 32(5): 15-19.
- [16] Qin L, Shi X, Leon A, et al. Dynamic luminance tuning method for tunnel lighting based on data mining of real-time traffic flow[J]. Building and Environment, 2020, 176(9): 115-127.
- [17] Qin L D, Xu L, Zhang W H. An intelligent luminance control method for tunnel lighting based on traffic volume[J]. Sustainability, 2017, 9(12): 2208.
- [18] 魏清华, 梁波. 基于车辆行为信息感知的隧道照明亮度自动调节系统[J]. 现代电子技术, 2019, 42(2): 94-97.
- [19] 蒋树屏, 林志, 王少飞. 2018 年中国公路隧道发展[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(7): 1217-1220.
- [20] 徐萌, 潘晓东, 陈丰. 彩色灯光视觉调节对长隧道驾驶催眠缓解作用的试验[J]. 中国公路学报, 2020, 33(11): 235-244.

(上接第 962 页)