

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2024.05.031

引用格式:李杰.高速公路养护施工防车辆闯入系统研究[J].公路与汽运,2024,40(5):168-171.

Citation:LI Jie.Research on anti-vehicle intrusion system in maintenance and construction of expressway[J].Highways &amp; Automotive Applications,2024,40(5):168-171.

# 高速公路养护施工防车辆闯入系统研究\*

李杰

(湖南省高速公路集团有限公司,湖南长沙 410199)

**摘要:** 随着中国高速公路总里程数的增加,养护施工频率增大,保护养护施工人员安全的智能防车辆闯入系统必不可少。文中以单片机 ESP32 为主控芯片设计高速公路养护施工防车辆闯入系统,通过光敏传感器测量车辆速度,当检测到车辆进入防闯入区域到达设定的阈值时,系统进行声光报警,有效保护道路施工人员的安全,提高道路施工安全系统的智能化水平。

**关键词:** 工程管理;高速公路;养护施工;防闯入系统;单片机;光敏传感器

中图分类号:U415.2

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2024)05-0168-04

截至 2021 年 12 月,中国高速公路总里程突破 16 万 km,汽车保有量达到 3.02 亿辆,均位居世界第一<sup>[1]</sup>。巨大的车流量导致高速公路损坏率增大,养护施工频率也增大,带来许多交通安全问题<sup>[2]</sup>。相较于普通道路,高速公路养护施工更容易发生严重交通事故。这是由于高速公路上车辆行驶速度快,制动距离长,本身就容易发生交通事故,加上养护作业需要封闭一定区域道路,少数驾驶员可能会由于注意力不集中或判断失误闯入养护施工区域,危及施工人员的安全。因此,防范外来车辆闯入对保障道路养护施工人员的安全至关重要<sup>[3-4]</sup>。道路养护施工时,为确保外来车辆不误入施工区域,常铺设大量交通锥并放置警示标志。这种方式效率普遍较低,还容易发生交通锥倾倒问题,不利于快速展开养护施工,防护性也较差<sup>[5-6]</sup>。为解决以上问题,本文研究开发高速公路养护施工防车辆闯入系统,主要利用激光束、传感器及单片机构建类似于电子围栏<sup>[7]</sup>的系统,实现车辆闯入时报警提示。

## 1 系统总体方案设计

### 1.1 总体方案设计框图

高速公路养护施工防车辆闯入系统将传感器采集的信号传送给微控制单元(Microcontroller Unit, MCU),MCU 进行计算与分析后对执行单元发出操作指令。该系统分为数据采集模块、数据处理模块

和动作执行模块<sup>[8]</sup>。单片机 ESP32 作为主控芯片,和复位电路、时钟电路、电源模块共同组成数据处理模块。信号执行模块由光电报警模块、蜂鸣器报警模块、电机控制模块组成,实现对高速公路养护施工人员多个感官的报警提示(见图 1)。信号采集模块、数据处理模块、信号执行模块全部集成在单元化结构中(见图 2)。

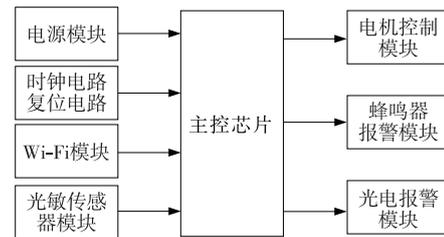


图 1 高速公路养护施工防车辆闯入系统整体框图

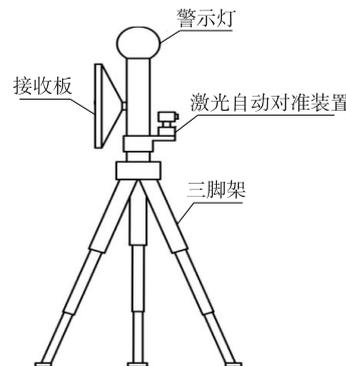


图 2 单元化系统结构

\* 基金项目:湖南省交通运输厅科技进步与创新计划项目(201910)

## 1.2 基于 TTC 模型的防闯入预警策略

以碰撞事件的 TTC (Time To Collision, 碰撞时间) 模型作为防闯入预警系统控制策略, 根据本车和前方障碍物之间的距离与速度比值关系进行预警。考虑到前方障碍物为防闯入区域, 只需计算驶入防闯入区域车辆的实际速度。记两个检测模块之间的距离为  $\Delta d$ , 第一个检测模块检测到车辆的时间为  $t_1$ , 第二个检测模块检测到车辆的时间为  $t_2$ , 则车的相对速度  $v$  为:

$$v = \frac{\Delta d}{\Delta t} = \frac{\Delta d}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

式中:  $\Delta t$  为  $t_2$  与  $t_1$  的差值。

记检测模块到防闯入区域的距离为  $d$ , 则:

$$t_{TTC} = \frac{d}{v} = \frac{d \Delta d}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

$\Delta t < 0$  时,  $t_{TTC} < 0$  恒成立, 表示有车辆驶离防闯入区域, 这种情况不需要进行预警;  $\Delta t \geq 0$  时, 表示有车辆驶离防闯入区域, 根据  $t_{TTC}$  的不同<sup>[9]</sup>, 将预警级别划分为 3 个等级:

$$\text{预警级别} = \begin{cases} 0 & 0 \leq t_{TTC} < 2 \\ 1 & 2 \leq t_{TTC} < 4 \\ 2 & t_{TTC} \geq 4 \end{cases} \quad (3)$$

$t_{TTC}$  为  $[0, 2)$  时, 表示车速缓慢或为行人及其他物体, 系统不预警;  $t_{TTC}$  为  $[2, 4)$  时,  $t_{TTC}$  达到阈值 1, 系统为一级预警, 采用光电预警, 提醒车辆减速;  $t_{TTC} \geq 4$  时,  $t_{TTC}$  达到危险值, 系统为二级预警, 采用声光预警模式, 提醒施工人员紧急避险。

## 2 系统硬件设计

### 2.1 主控芯片

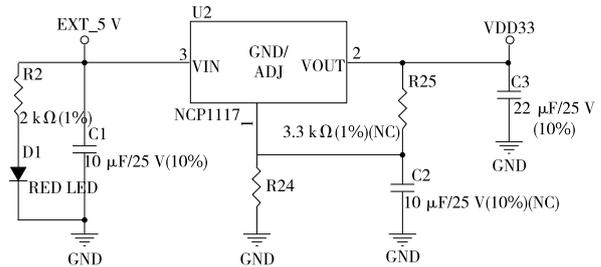
ESP32 是一款集成了 Wi-Fi 和蓝牙功能的 32 位单片机, 主频可达 240 MHz, 而 51 单片机的主频一般在 12 MHz 左右, 这意味着 ESP32 可以执行更多的指令和任务, 处理速度更快。ESP32 还拥有 520 kB 的 SRAM 和 4 MB 的 Flash, 可以存储更多的数据和代码, 支持更复杂的功能和算法。

ESP32 拥有丰富的外设和接口, 包括: 24 个通用输入、输出端口 (GPIO), 可用于控制 LED、按键、继电器等; 3 个通用异步收发器 (UART), 可用于串口通信; 3 个串行外设接口 (SPI), 可用于连接闪存、SD 卡、LCD 屏幕等; 2 个 I2C 总线, 可用于连接传感器、扩展芯片等; 2 个数字模拟转换器 (DAC), 可用于输出模拟信号; 18 个脉冲宽度调制 (PWM) 通道,

可用于控制电机、LED 灯等。而 51 单片机的外设和接口较少, 只有几个 GPIO、1 个 UART、1 个 SPI 等。

### 2.2 电源模块

稳定的电源是保证单片机正常工作的基础。防车辆闯入系统采用 USB 供电, USB 输入的电一般为 +5.0 V, 而单片机的工作电压为 +3.3 V, 因此电源模块设计采用 NCP1117 线性稳压芯片将 USB 输入电源转换后单独给单片机供电 (见图 3)。



D1 为供电正常指示灯; NCP1117 的 3# 脚接电源输入, 2# 脚接线性稳压器的输出端, 1# 脚接地; C1、C2、C3 为稳压和滤波电容; R24、R25 为分压电阻, 使输出电压为 +3.3 V

图 3 防车辆闯入系统的电源模块

### 2.3 电机驱动模块

PWM 舵机的伺服系统由可变宽度的脉冲控制, 控制线用来传送脉冲。一般而言, 舵机的基准信号周期为 20 ms, 占空比为 0.5~2.5 ms。1.5 ms 这个基准信号定义为中位信号, 脉宽为 1.5 ms 时对 270°舵机来说就是控制其处于 135°的位置。舵机一般都有最大转动角度和最小转动角度, 中间位置的定义是从最大角度到最小角度的中间位置。不同舵机的最大转动角度可能不相同, 但其中间位置的脉冲宽度是一定的, 为 1.5 ms。

### 2.4 声光报警模块

单片机根据接收数据选择声光预警措施, 单片机 IO 口输出高电平, 驱动声光报警器进行预警, 声光报警器通过视觉和听觉对施工区域的施工人员进行预警提示。单片机 IO 口输出 PWM 波控制声光报警器, 通过 PWM 的占空比控制报警器中 LED 灯光的强度。

### 2.5 光敏传感器模块

光敏电阻对环境光强度较敏感, 不同环境光强度会改变光敏电阻的阻值, 利用这一特性开发光敏传感器, 用来检测周围环境的光线强度。光照强度小于设定的阈值时, 光敏传感器 DO 口输出高电平; 大于设定的阈值时, DO 口输出低电平。

### 3 系统软件设计

系统初始化后,启动激光自动对准功能模块,两个 ESP32 通过 Wi-Fi 主从模式连接,主机端口 15 连接接收板信号线,主机以 50 ms 为周期对端口 15 进行检测,用全局变量 State 保存该端口信息,并将数据同步发送给从机。接收板被激光束照射时,输出低电平信号给主机,从机接收到信号后控制舵机停止。图 4 为系统软件流程。

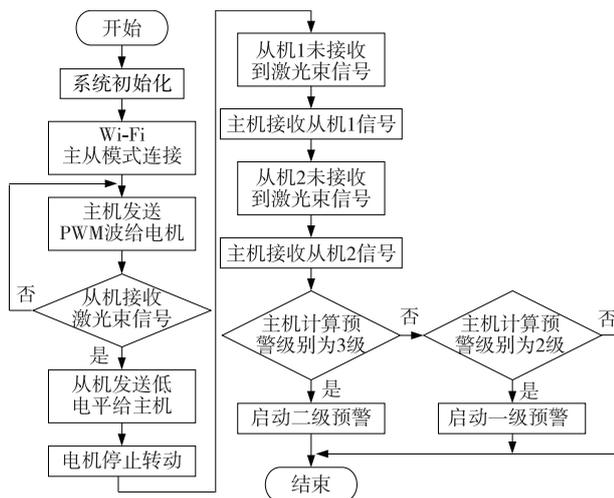


图 4 防车辆闯入系统软件流程

两个 ESP32 通过 Wi-Fi 通信,并分别连接不同的接收板。按顺序遮挡两个激光束,考虑到速度需要根据现场激光束的水平距离进行计算,只要求计算两个激光束被遮挡的时间差<sup>[10]</sup>。

当主机检测到激光束被遮挡时,将当前时间戳存储在一个结构体中,并使用 ESP-NOW 库将该结构体发送到从机。从机接收到数据后,等待连接 15 端口接收板的响应。响应后,从机记录激光束被遮挡的时间戳,与主机发送的时间戳进行对比,计算时间差。这样能避免出现传输延迟导致的时间差计算不准确的问题。

此外,程序设计接收板的遮挡顺序只能是从 1 号到 2 号,施工区域车辆驶出时不会触发警报<sup>[11]</sup>。

## 4 系统测试

### 4.1 激光自动对准功能测试

经测试,远程传输数据有一定延迟<sup>[12-13]</sup>,导致舵机对准精度不足。后续调试中延长每次循环的延迟时间,使舵机达到 1° 的扫描精度。根据对准装置

与接收板的距离,可测算接收板所需最小宽度,计算公式如下:

$$s = d \tan \theta \quad (4)$$

式中: $s$  为光敏传感器的最小宽度; $d$  为激光到光敏传感器的距离; $\theta$  为电机单次转到的角度。

根据多次实测结果,3 m 距离下,实际对准精度为 5 cm,满足使用要求。

### 4.2 测速功能模块测试

测速系统的测试设备由两支激光笔和两个接收板组成,单片机输出两个接收板的时间差依次为 1 059 ms、739 ms、4 759 ms、713 ms、2 169 ms。通过 Premiere 软件查看录制的测试视频,找出两个激光束分别被遮挡的时间点,从而计算两个激光束被遮挡的时间差(见表 1)。

表 1 测速功能模块测试结果

批次	理论值		系统测试值		准确度/ %
	时间差/ ms	速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	时间差/ ms	速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	
1	1 125	2.667	1 059	2.833	94.14
2	811	3.699	739	4.060	91.11
3	4 840	0.620	4 759	0.630	98.41
4	762	3.937	713	4.206	93.60
5	2 264	1.325	2 169	1.383	95.81

由表 1 可知:理论时间差与系统测试时间差之间的偏差会在一定范围内波动,随着时间差的增加,测速系统的测速准确度增大。因此,实际布设系统时,两个平行激光束之间的距离应尽可能长,但不能超过常见车辆长度。

尽管系统的测速准确度不算太高,但依然满足系统设计的安全需求。因为对于低速行驶的车辆,系统测速的精准度会较高,误判率较低,不容易触发警报系统;车辆行驶速度过快时,系统测速虽然不太精准,但车辆超过速度阈值,系统就会触发警报。虽然这会导致触发警报的速度阈值不准确,但实际影响较小,可适当调高速度阈值,以减小误触发概率。

## 5 结语

本文针对高速公路养护施工,设计防车辆闯入系统,取代或辅助现有交通锥封闭道路的方法,提高施工安全性。该系统主要利用激光束、传感器及单片机构建类似于电子围栏的系统,实现车辆闯入时

报警提示功能;利用多组激光束与传感器的配合,实现测速及分辨人、车的功能,发现车辆闯入时,利用警报装置提示施工人员注意避险。该系统部署方式简单,能通过云台自动校准,适用于大部分路段,且设备较轻便,易于运输与快速部署。总之,该系统具有一定的实用价值,能提高高速公路养护施工效率,降低事故发生概率。

**参考文献:**

[1] 李洁.高速公路养护维修作业区危险因素研究[J].交通世界(上旬刊),2018(7):164-165+171.  
 [2] 王兴平.高速公路养护管理工作特点及问题分析[J].交通世界,2022(21):182-184.  
 [3] 周卓.分析公路养护安全生产工作与事故[J].黑龙江交通科技,2021,44(1):190+192.  
 [4] YE Y T, HE J, WANG H F, et al. Research on influencing factors of traffic conflicts in freeway diverging area during the maintenance period [J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2023, 149(2):120-130.  
 [5] LIN H, ZHANG Y F, GAO F L. Problems and countermeasures of expressway maintenance manage-

ment[C]//2020 5th International Conference on Modern Management and Education Technology (MMET 2020). 2020:111-140.  
 [6] 王小丁.D市城市道路养护管理对策研究[D].大连:大连理工大学,2022.  
 [7] 张宗芳.一种可视化智能防触电安全保护电子围栏设计与研究[J].科技与创新,2022(3):21-23.  
 [8] 冷智鑫.基于多传感器融合的无人车防撞预警系统设计[D].长春:吉林大学,2021.  
 [9] 高霏霏.基于 STC89C52 单片机智能汽车防撞系统设计[J].常州工学院学报,2023,36(1):34-39.  
 [10] 马龙.双激光短程机动车测速仪研究[D].北京:北方工业大学,2016.  
 [11] 李杰,朱福民,张振武,等.一种基于机器视觉的道路施工安全报警系统:CN209980407U[P].2020-01-21.  
 [12] 慕文洋.基于 ZigBee-WiFi 技术的山区公路自然灾害监测系统设计[D].北京:北京交通大学,2023.  
 [13] 史磊.基于 STM32 嵌入式的无线通信远程数据传输控制系统设计[J].计算机测量与控制,2022,30(11):111-115+146.

收稿日期:2023-12-30

\*\*\*\*\*

(上接第 167 页)

[6] 桂滨,周伟,王健华,等.公路网改扩建决策优化双层规划模型[J].交通运输工程学报,2012,12(5):79-84.  
 [7] 程学庆,贾江涛,李月,等.干线公路管理站选址双层规划模型与算法[J].交通运输系统工程与信息,2016,16(3):207-213.  
 [8] SINHA A, MALO P, DEB K. A review on bilevel optimization: from classical to evolutionary approaches and applications [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2018, 22(2):276-295.  
 [9] ZHANG L X, QIN J, HE Y X, et al. Network-level optimization method for road network maintenance programming based on network efficiency[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(12):4882-4889.  
 [10] 林文新,王建伟,林渝钧.基于养护成本的高速公路收费费率问题研究[J].交通运输系统工程与信息,2013,13(5):145-149.  
 [11] CHEN W, ZHENG M L. Multi-objective optimization for pavement maintenance and rehabilitation decision-making: a critical review and future directions [J].

Automation in Construction, 2021, 130:103840.1-103840.23.  
 [12] AL AMIN M. Pavement maintenance program at the network level: mixed-integer programming with multiple objectives [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2023, 2677(1):490-502.  
 [13] AUGERI M G, GRECO S, NICOLOSI V. Planning urban pavement maintenance by a new interactive multiobjective optimization approach[J]. European Transport Research Review, 2019, 11(1):1-14.  
 [14] 邹群,虞安军,邹国平.高速公路路面养护决策混合遗传优化方法[J].交通运输工程学报,2007,7(4):63-66.  
 [15] 程思洁.基于双层规划的多模式高速公路差异化收费定价研究[D].北京:北京交通大学,2023.  
 [16] 阮彬.基于绿色和协调双层发展规划的区域公路网络结构优化研究[D].西安:长安大学,2017.

收稿日期:2023-08-30