

基于532 nm半导体激光拒止器系统设计与实验研究

朱小勇, 王 嶝, 叶文镇, 张翠恒

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2025年3月13日; 录用日期: 2025年4月22日; 发布日期: 2025年5月9日

摘 要

针对非致命激光拒止需求, 本文设计了一种基于532 nm半导体激光器的自适应拒止系统。该系统通过激光测距模块实时获取目标距离, 结合人眼安全标准(MPE/NOHD)动态调节激光输出功率(0.5~3 W)及发散角(1~10 mrad), 确保目标位置激光功率密度稳定在 $0.1\sim 2.55\text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的安全范围内。硬件上采用STM32F103ZET6微控制器为核心, 集成脉冲激光测距模块(精度 $\pm 1\text{ m}$)、变焦光学系统及PWM调制驱动电路; 软件上实现闭环控制算法, 支持自动参数调整与人机交互。实验结果表明, 系统在10~400 m范围内可精确控制到靶功率密度(误差 $< 30\%$), 具备非致命眩目效果。本研究为激光拒止技术的工程化应用提供了理论依据与技术支撑。

关键词

激光拒止器, 532 nm半导体激光器, 自动变焦, 激光测距, 非致命武器

Design and Experimental Research of 532 nm Semiconductor Laser Rejection System

Xiaoyong Zhu, Di Wang, Wenzhen Ye, Cuiheng Zhang

Institute of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Mar. 13th, 2025; accepted: Apr. 22nd, 2025; published: May 9th, 2025

Abstract

In order to meet the requirements of non-lethal laser rejection, an adaptive rejection system based on 532 nm semiconductor laser is designed. The system obtains the target distance in real time

文章引用: 朱小勇, 王嶝, 叶文镇, 张翠恒. 基于 532 nm 半导体激光拒止器系统设计与实验研究[J]. 传感器技术与应用, 2025, 13(3): 242-255. DOI: 10.12677/jsta.2025.133024

through the laser ranging module, and dynamically adjusts the laser output power (0.5~3 W) and divergence angle (1~10 mrad) in combination with the human eye safety standard (MPE/NOHD) to ensure that the laser power density at the target position is stable within the safe range of 0.1~2.55 mW·cm⁻². The hardware adopts STM32F103ZET6 microcontroller as the core, and integrates a pulsed laser ranging module (accuracy ±1 m), a zoom optical system and a PWM modulation driver circuit. The closed-loop control algorithm is implemented in the software, and automatic parameter adjustment and human-computer interaction are supported. The experimental results show that the system can accurately control the target power density in the range of 10~400 m (error < 30%), and has a non-lethal dazzling effect. This study provides a theoretical basis and technical support for the engineering application of laser rejection technology.

Keywords

Laser Rejector, 532 nm Semiconductor Laser, Auto Zoom, Laser Ranging, Non-Lethal Weapons

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

激光拒止器作为非致命武器[1], 可通过低能激光束使人眼暂时失明, 广泛应用于反恐、安防[2]等领域。532 nm 绿光因对人眼敏感性强且穿透力佳, 成为理想光源[3]。然而, 现有系统多采用固定功率输出, 难以兼顾远距离有效性与近距离安全性。为此, 调节激光功率和光束发散角对眩目效果有显著影响[4]。本文基于人眼安全标准[5], 提出一种自适应激光拒止系统, 通过动态调节激光参数实现目标功率密度的精准控制。

国内外研究多聚焦于激光安全阈值[6]与光学设计[7], 但对自动化动态调控研究较少。本文结合激光测距与 PWM 调制技术, 设计光机电一体化系统, 突破传统固定参数限制, 显著提升系统安全性与适应性。

2. 系统总体设计

2.1. 系统架构

基于 532 nm 半导体激光器的拒止系统通过光机电一体化设计, 集成了激光测距、动态功率控制、人机交互、图像采集及电源管理等功能模块。其核心组成结构主要有核心处理器和几大功能系统: 激光测距系统, 拒止激光发射系统, 人机交互处理系统, 图像处理系统和电源系统。

各子系统协同工作, 实现了目标检测、参数计算、激光发射和效果评估的全流程自动化控制。控制系统根据激光测距系统提供的数据, 结合激光安全标准, 自动调整激光参数, 确保系统的高效性和安全性。532 nm 半导体激光拒止器系统硬件结构图如图 1 所示。

2.2. 关键算法与模型

不同距离下激光到靶功率密度由两个参数决定, 即出射激光输出功率和出射激光发散角, 那么经过计算选用如表 1 所示的理想条件下激光参数实现 10 到 400 m 拒止效果, 尽量使到靶功率密度在 0.1 mW·cm⁻² 至 2.5 mW·cm⁻² 的中值附近, 以削减大气等环境因素的误差影响。

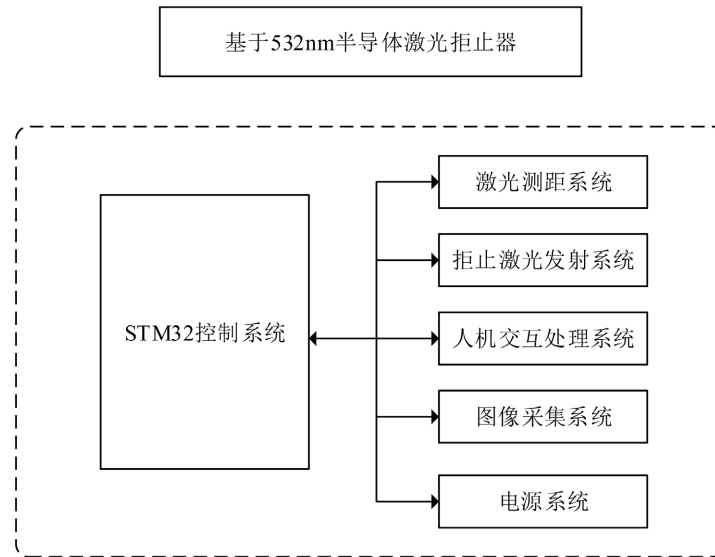


Figure 1. Block diagram of the system hardware
图 1. 系统硬件结构框图

Table 1. Laser parameters selected under ideal conditions
表 1. 理想条件下选用的激光参数

L [m]	$P(L)$ [W]	A [mrad]	$r(L)$ [cm]	$E(L)$ [mW·cm ⁻²]
10~20	0.5	10	11.5~21.5	0.34~1.20
20~30	0.5	5	11.5~16.5	0.58~1.20
30~50	1	4	13.5~21.5	0.68~1.74
50~100	1.5	3	16.5~31.5	0.48~1.75
100~180	2	2	21.5~37.5	0.45~1.38
180~230	2	1	19.5~24.5	1.06~1.67
230~400	3	1	24.5~41.5	0.55~1.59

系统通过闭环控制架构实现激光参数动态优化。
激光到靶功率密度计算基于公式：

$$E_{\text{靶}}(L) = \frac{P_{\text{出}}}{\pi(r_0 + \theta \cdot L)^2} \tag{1}$$

其中， $P_{\text{出}}$ 为输出功率， θ 为发散角， L 为目标距离， r_0 为出光口径，系统依据目标距离动态优化 $P_{\text{出}}$ 与 θ ，确保功率密度符合安全阈值。

2.3. 关键硬件实现

2.3.1. 激光测距模块

激光测距模块[8]作为激光拒止器系统中不可或缺的组成部分，决定了系统的测距功能，激光测距模块的选择又在很大程度上决定了最后的调节激光功率密度的精准度，因此设计一个适合本设计系统的激光测距模块至关重要。本系统采用脉冲式测距(精度±1 m)，激光波长为 905 nm，工作温度为-20℃至+50℃，

测量距离范围需符合要求、体积小且功耗低,适用于普遍情况的距离测量场景。激光脉冲测距硬件整体处理流程图如图 2 所示。

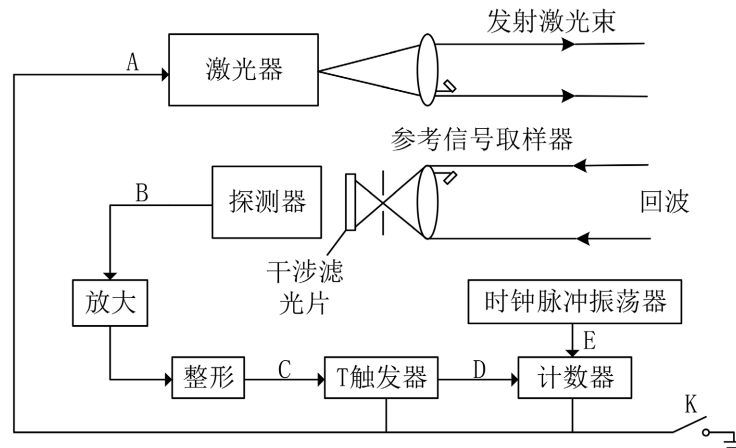


Figure 2. Flowchart of the overall processing of laser pulse ranging hardware
图 2. 激光脉冲测距硬件整体处理流程图

首先选择 905 nm 的半导体激光器和暗电流为 5 nA 的 APD 探测器,半导体激光器向被测目标发射激光脉冲,光脉冲穿过大气到达目标,其中部分激光经目标反射后返回测距点,并被 APD 探测器接收;脉冲获取电路选择 TI 的 LM555CM 定时器通过外接 RC 网络获得 1 KHz 的方波信号,后通过 RC 积分电路以及或非门后获得 200 ns 的脉冲信号。通过调节 R1、R2、C1 的值来调节 555 定时器的输出方波的频率,调节 R3、C3 的值来调节 OUT 端输出的脉冲宽度,脉冲获取电路如图 3 所示。

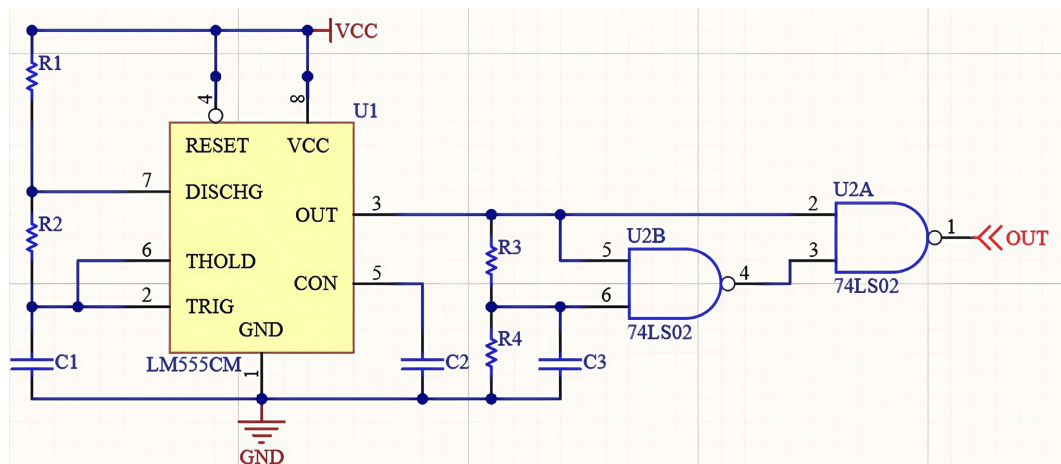


Figure 3. Pulse acquisition circuitry
图 3. 脉冲获取电路

选择 RLC 振荡电路作为激光二极管的驱动电路,通过开关器件控制储能释放电能。脉冲驱动电路如图 4 所示。

电路中 R5、L1、C5、L2、R6、D2 组成充电电路, C5 作为储能电容, C6 作为补偿电容。Q1、C5、L2、R6、LD 组成放电的 RLC 振荡电路。为使电路获得那个较好的电流曲线, RLC 振荡电路工作在欠阻尼状态,尽量保证能量集中在振荡的第一个峰值区域。

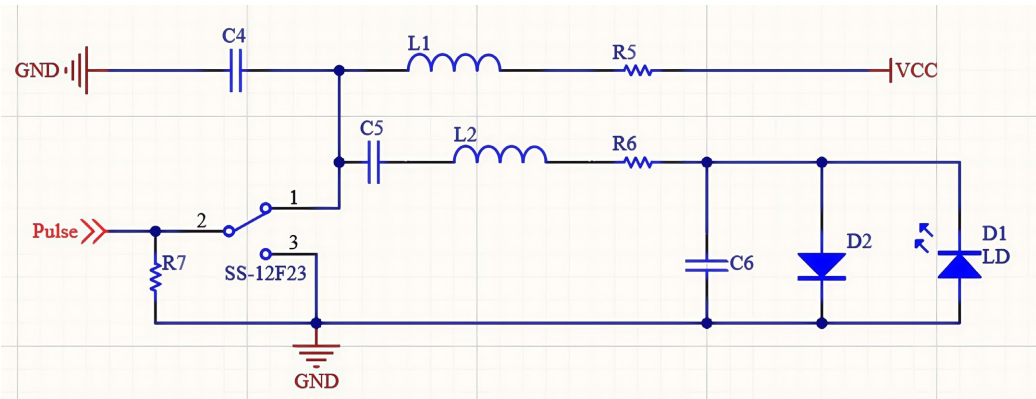


Figure 4. Pulse drive circuitry
图 4. 脉冲驱动电路

将滤波放大后的回波脉冲信号，转为 TTL 输出。选用美信公司的 MAX913CSA 芯片，构成迟滞比较器，增强抗噪声能力。电路中改变 R3、R4 的值可改变比较阈值，改变 R4、R5 的值调节电路的正反馈也可直接使用 LM555 构成施密特触发器作脉冲整形电路。脉冲整形电路如图 5 所示。

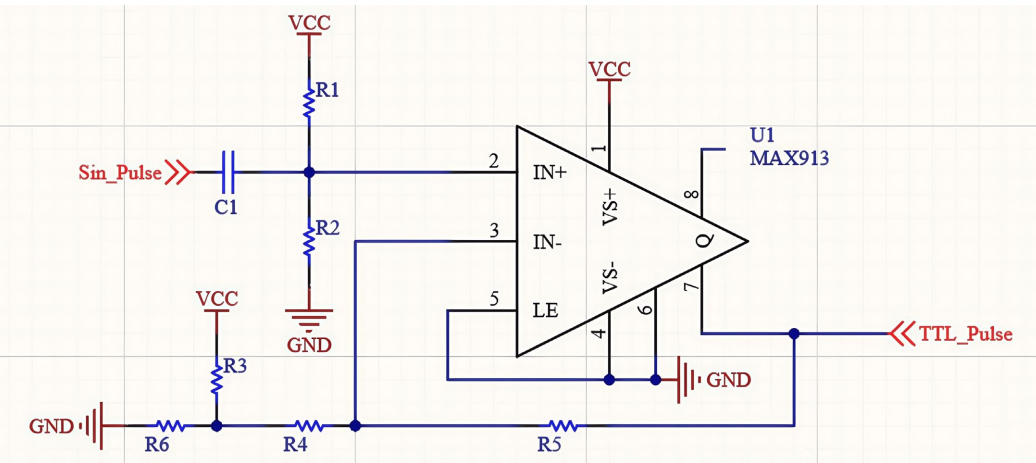


Figure 5. Pulse shaping circuit
图 5. 脉冲整形电路

本设计系统的激光测距模块设计的测量范围为 10 m~400 m，使用的波长为 905 nm，光学接收口径为 18 mm，测量精度达到 ± 1 m，测量频率 3 Hz，可以满足本设计系统的技术标准。另外，该激光测距模块的 TTL 供电电压 3.3 V 至 3.7 V，运行功耗 ≤ 500 mW，有一个串行通信接口，提供指令集和调试软件进行相关调试和操作，激光测距模块参数如表 2 所示。

Table 2. Parameters of the laser ranging module
表 2. 激光测距模块参数参数

激光测距模块参数	具体数值
波长[nm]	900~908
测量距离[m]	10~400
测量分辨率[m]	0.1

续表

测量精度[m]	±1
测量频率[Hz]	3
供电电压[V]	3.3 ± 0.3
运行功耗[mW]	≤500
光学接收口径[mm]	18
工作温度[°C]	-20~50
控制方式	指令集
通信类型	3.3 V TTL 串口

同时激光测距模块的尺寸为 2.4 cm × 2.4 cm × 4.6 cm，重量约为 28 g，也满足了本系统对体积的要求。

2.3.2. 激光变焦镜头

激光变焦镜头设计[9]同样是激光拒止器中重要技术之一，本激光拒止器系统的激光变焦镜头设计指标为长度为 44 mm，直径 36 mm 的变焦镜头，使得出光光束直径达到 30 mm，激光光束发散角的范围在 1 mrad~10 mrad，通过调节发射镜组的一组透镜实现扩束系统出射光束发散角变化。设计光路如下图 6 所示，采用一级扩束，通过负透镜前后移动进行发散角调节。

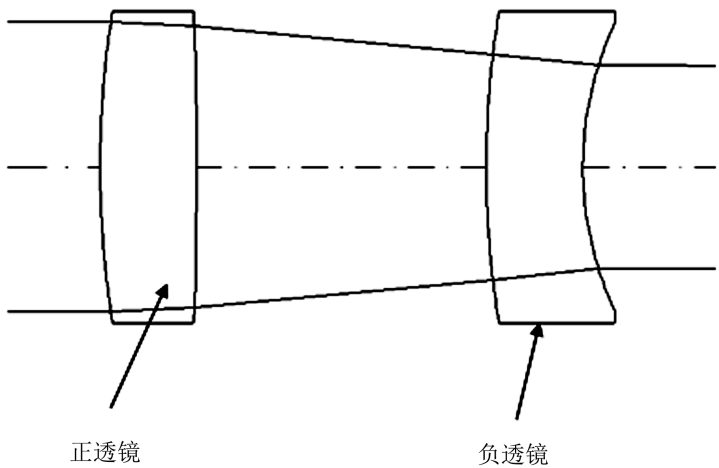


Figure 6. Schematic diagram of the optical system of a laser zoom lens
图 6. 激光变焦镜头光学系统简图

变焦系统由前固定组、变倍镜组、驱动控制组件等几部分组成，其中各镜组内包含机械镜筒和光学镜片，驱动控制组件上有电位计、步进电机和凸轮等结构部件。镜组设计采用圆柱凸轮实现其发射角变化功能，由于空间尺寸限制，变倍凸轮直径不能做的很大，但又要同时避免变倍过程中凸轮卡死。变倍镜组主要通过负透镜和正透镜的位置变化，实现光学焦距的变化。其结构如图 7 所示。变倍控制采取闭环控制的方式，使用变倍电位器作为位置反馈，结构简单、工作可靠、易于实现。设置两个控制开关：长焦控制和短焦控制。在长、短焦极限处设有微动开关，控制变倍的极限位置，避免发生剧烈的碰撞而使系统工作失灵。

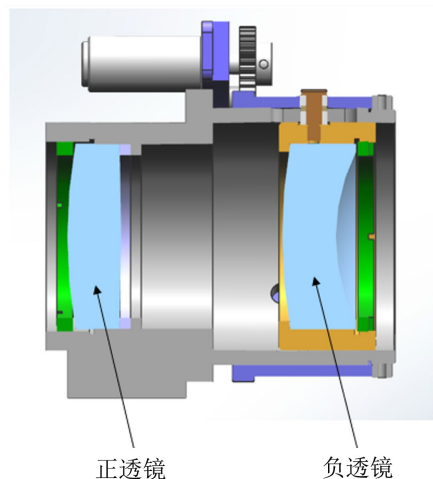


Figure 7. Mechanical structure of the mirror group
图 7. 镜组机械结构

变焦控制单元控制结构如图 8 所示，包括变焦控制单元，变焦电机功率放大电路和传感器检测单元组成，变焦控制单元采用数字式闭环控制方式，作为核心处理器的重要组成部分，由核心处理器完成伺服处理。传感器检测单元由采集变焦电位器和限位传感电路组成，分别以模拟电压形式和开关量传递给变焦控制单元；电位器用于实现变倍电机位置闭环控制；限位传感电路用于采集长焦情况的到位信号和短焦情况的到位信号。

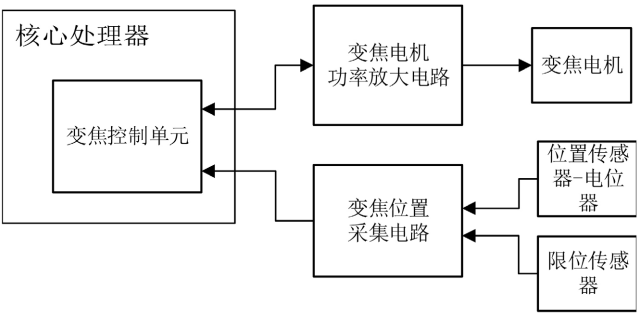


Figure 8. Diagram of the control structure of the zoom control unit
图 8. 变焦控制单元控制结构图

该激光器镜头大小重量适用于手持设备，根据出射激光发散角计算，在 10 至 400 m 范围内不同距离下理论到靶的光斑半径与面积如表 3 所示。

Table 3. Theoretical spot radius and area to the target at different distances
表 3. 不同距离下理论到靶的光斑半径与面积

L [m]	A [mrad]	$r(L)$ [cm]	$S(L)$ [cm ²]
10	10	11.5	415.50
20	5	11.5	415.50
30	4	13.5	572.56
50	3	16.5	855.30

续表

100	2	21.5	1452.20
180	1	19.5	1194.59
230	1	24.5	1885.74
400	1	41.5	5410.61

2.3.3. 电源系统

电源系统给整个系统供电，电池管理放电电路可以分为锂电池充电电路、电压转换电路以及锂电池保护电路。锂电池采用的是 3 个 18,650 尖头 4.2 V 锂电池串联成 12 V 输入电压，通过电量显示模块检测锂电池电量，电池管理放电电路中的电压转换电路为各个系统供电，并由锂电池保护电路来防止锂电池过热，通过锂电池充电电路为锂电池充电，电源系统结构框图如图 9 所示。

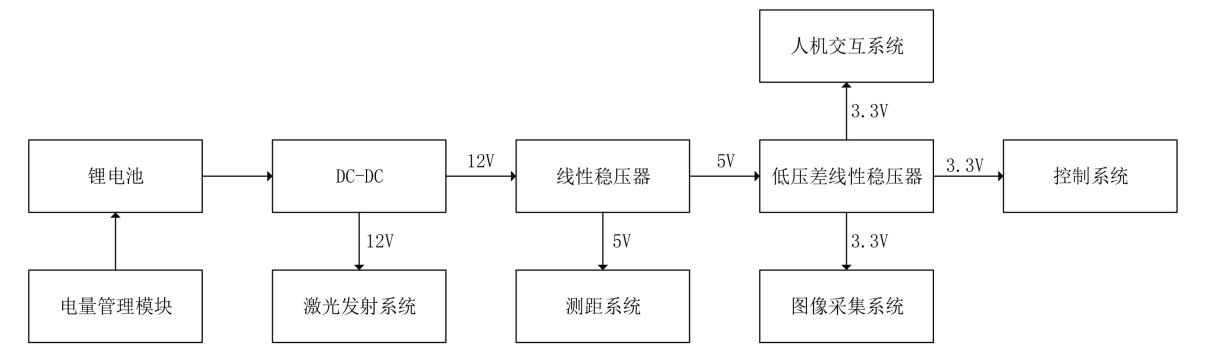


Figure 9. Block diagram of the power supply part
图 9. 电源部分结构框图

电池管理放电电路中的电压转换电路主要由 XL6019E1、CJ7805 和 LD1117S33CTR 组成。通过 DC-DC 转换器芯片 XL6019E1 稳定输出 12 V 电压，线性稳压器 CJ7805 则将 12 V 电压转换成 5 V 电压，再经过低压差线性稳压器 LD1117S33CTR 可以产生 3.3 V 的电压，可以分别满足拒止激光电源、摄像头模块电路、激光测距模块电路、液晶显示电路和 STM32F103ZET6 的工作需求。DC-DC 转换器芯片 XL6019E1 外围电路图如图 10 所示。

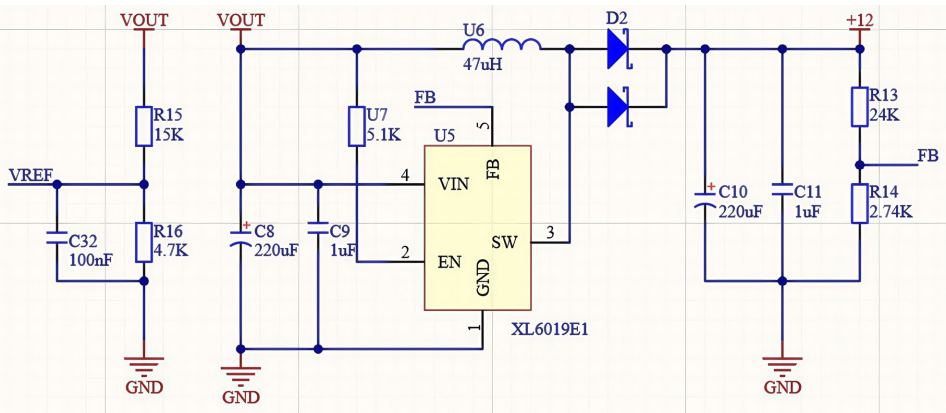


Figure 10. XL6019E1 peripheral circuit diagram
图 10. XL6019E1 外围电路图

在锂电池保护电路中本文选择 CM1032 作为保护电路芯片,其主要用于锂电池(如 3.7 V 锂离子电池或锂聚合物电池)的过充、过放、过流和短路保护。它通过监测电池的电压、电流等参数,确保电池在安全范围内工作,从而延长电池寿命并防止安全隐患。锂电池保护电路图如图 11 所示。

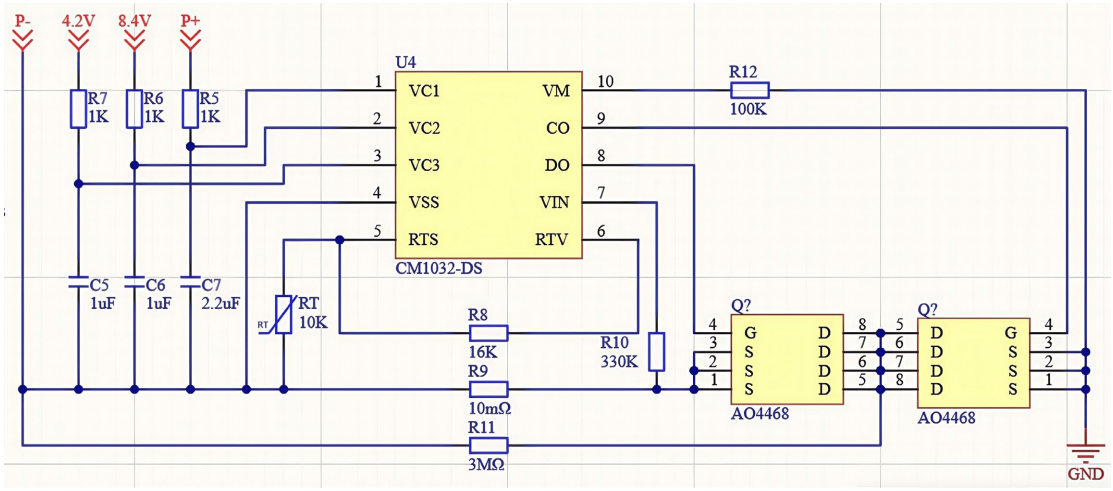


Figure 11. Lithium battery protection circuit
图 11. 锂电池保护电路

锂电池充电管理芯片 CN3303 通过内部的 PWM 控制电路和反馈调节电路实现锂电池的充电管理: 预充电阶段: 当电池电压低于设定的阈值(通常为 2.9 V~3.0 V)时, 芯片以较小的电流对电池进行预充电, 防止电池过放损坏; 恒流充电阶段: 当电池电压上升到预充电阈值以上时, 芯片以设定的恒定电流对电池充电; 恒压充电阶段: 当电池电压接近满电电压(通常为 4.2 V)时, 芯片切换到恒定电压充电模式, 逐渐减小充电电流; 充电完成: 当充电电流减小到设定的截止电流时, 芯片判定电池已充满, 停止充电并进入待机模式。CN3303 外围电路图如图 12 所示。

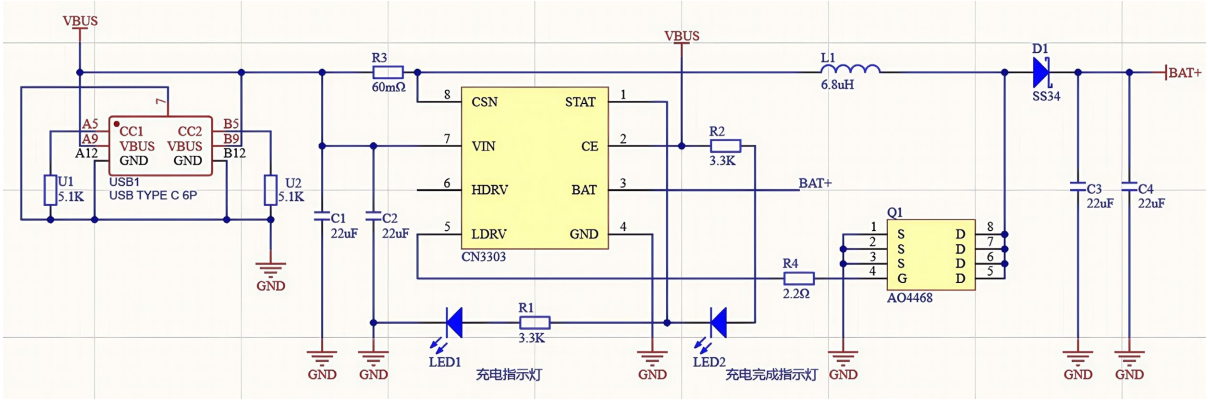


Figure 12. CN3303 peripheral circuit diagram
图 12. CN3303 外围电路图

3. 系统软件设计

3.1. 系统软件总流程

本激光拒止器系统设计的主要功能在于拒止功能, 本设计系统的主程序流程图如图 13 所示。系统接

通电源并经过初始化后,通过按键模块输入开始拒止功能,测量到目标距离并开始摄像,激光测距模块测量距离后将距离数据发送至串口。主控制器在收到距离数据后,再通过显示模块显示距离数据,同时根据测量信息调节拒止激光输出功率并打开拒止激光,完成拒止功能,在拒止激光运行 10 s 后,出于安全考虑自动关闭拒止激光,以防止对目标造成损伤。如若未完成拒止目标,可以选择重新拒止,若结束工作则关闭激光和摄像,结束拒止功能。

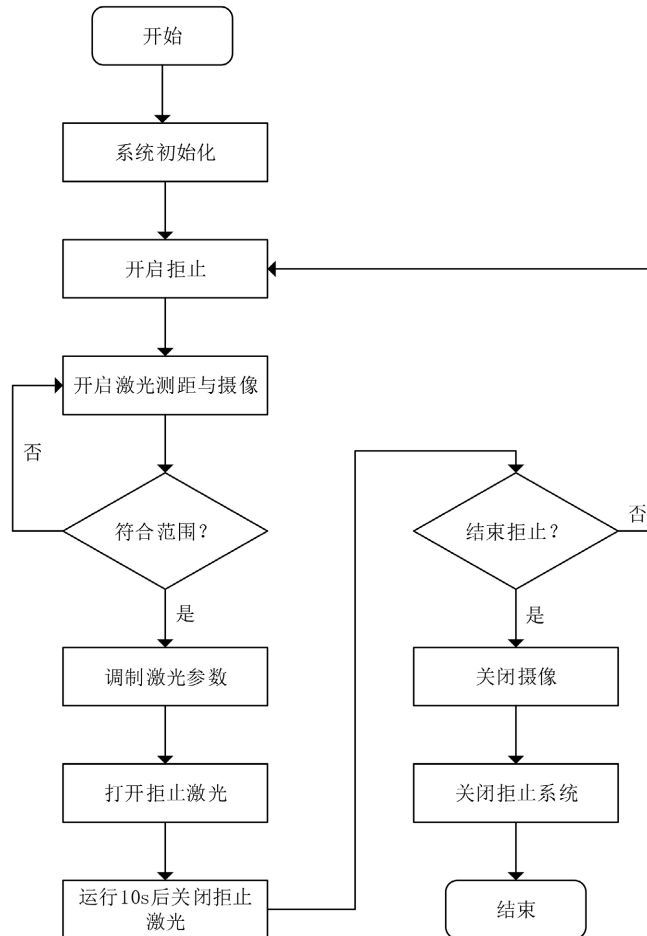


Figure 13. Main program flow chart
图 13. 主程序流程图

3.2. 拒止激光参数控制程序

在本系统中,当控制系统收到来自激光测距系统的测量数据后,依据激光安全中的最大允许曝光(MPE)与标称眼危害距离(NOHD)相结合的人眼安全理论,计算到达目标距离的光斑尺寸和输出功率,拒止激光发射系统自动调整拒止激光参数,而拒止激光发射系统主要通过 PWM 调制的方式控制拒止激光输出功率与激光发散角。

PWM 的基本原理是通过改变信号的脉冲宽度来实现对信号的控制。它由一个固定频率的周期性方波和一个可调节的占空比组成。占空比表示高电平脉冲的时间与一个周期的比例。通过调整占空比,可以控制输出信号的平均功率或电压。本系统中通过 PWM 控制占空比来改变拒止激光的平均输出功率与发散角。

本系统中通过 PWM 控制占空比来改变拒止激光的平均输出功率与发散角。在接收到激光测距模块发送来的数据后, 控制系统开始拒止激光参数控制程序: 系统启动, 进入初始化阶段。设置 PWM 引脚为输出模式, 初始化变量(如当前占空比、目标功率等)。检测用户输入按键, 获取距离信息, 设置 PWM 的初始占空比(如 50%), 对应激光的初始输出功率。根据当前占空比输出 PWM 信号, 控制拒止激光二极管的平均电流, 从而调节激光输出功率。判断是否需要重新拒止调整占空比。再根据调整后的占空比更新 PWM 信号, 改变激光输出功率, 同时, PWM 控制信号控制电机功率放大器的 H 桥实现对功率放大器的数字控制, 从而实现对电机的驱动控制, 改变出射激光发散角。返回检测输入步骤循环执行上述过程, 实时响应用户输入。

拒止激光参数控制程序流程图如图 14 所示, 在得到激光测距系统的正确测距数据后, 根据目标距离调制 PWM, 并输出 PWM 信号, 改变激光输出功率与发散角, 而后根据目标距离的变化改变, 激光输出功率与发散角也会随之改变以实现拒止功能的闭环控制。

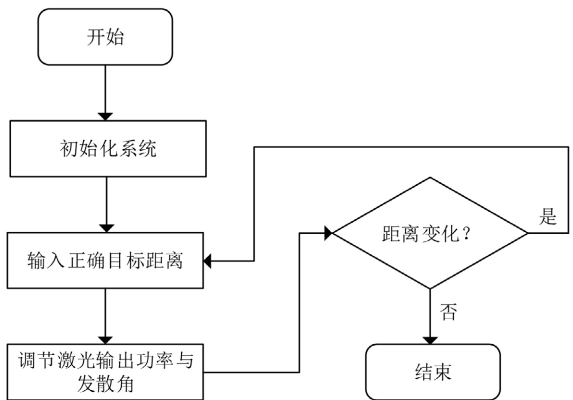


Figure 14. Flow diagram of laser parameter control program
图 14. 激光参数控制程序流程图

4. 实验结果与分析

4.1. 激光测距性能

首先对激光测距模块进行测距实验, 测试激光测距系统的精度, 观察测距实验结果是否准确。在 10~400 m 范围内, 测距模块标准差为 0.0447~0.8234 m (表 4), 满足设计指标(± 1 m)。远距离误差主要由大气衰减导致。

Table 4. Mean and standard deviation of multiple groups of distance data at different distances
表 4. 不同距离下多组距离数据平均值和标准差

L [m]	$\bar{L}$ [m]	$\sigma(L)$
10	9.9	0.0447
20	20.1	0.0707
50	49.9	0.2074
100	100.1	0.2280
200	199.9	0.3421
300	299.8	0.6907
400	400.3	0.8234

从表 4 可以看出, 七组测距样本的平均值和实际距离值差别均不大, 大概和实际距离值相差 0.1% 左右, 前两组的测距标准差均在 0.05 m 左右; 当目标距离为 50 m 时, 精度有所降低, 为 0.2074 m; 在目标距离为 100 m 时, 标准差约为 0.2280 m, 平均离散程度较小, 可能与实验数据较少有关; 当目标距离为 400 m 时, 精度降为整体最低, 为 0.8234 m。总体来看, 在 10~400 m 范围内, 该激光测距模块随着目标距离的增加, 精度有所降低, 这是由于激光二极管功率不足而导致测距精度的下降, 但整体测距标准差均在 1 m 以内, 符合举止系统设计要求的精度。

4.2. 激光变焦镜头性能

激光变焦镜头的功能主要是通过调节发射镜组的一组透镜实现扩束系统出射光束发散角变化, 能够根据激光测距模块获得的距离数据计算到达目标距离的光斑尺寸, 使激光发射系统在 1 mrad~10 mrad 范围内自动调整出射激光发散角。接下来进行激光变焦镜头测试实验, 测试激光变焦镜头是否随着不同目标距离的改变而改变出射激光发散角, 达到拒止效果。

表 5 为不同距离下到靶光斑面积的理论值 $S(L)$ 与实际值 $\bar{S}(L)$, 其中实际值为对到靶光斑半径进行 5 次测量后得到半径的平均值, 再计算到靶光斑面积的平均值。经过到靶光斑面积理论值与实际值的对比计算可得绝对误差值 δ 与相对误差值 Δ , 就可以得出激光变焦镜头的精准度。

Table 5. Theoretical and actual values of the target spot area at different distances

表 5. 不同距离下到靶光斑面积的理论值与实际值

L [m]	A [mrad]	$S(L)$ [cm ²]	$\bar{S}(L)$ [cm ²]	δ [cm ²]	Δ [%]
10	10	415.50	422.73	+7.23	+1.74
20	5	415.50	430.05	+14.55	+3.50
30	4	572.56	598.28	+25.72	+4.49
50	3	855.30	886.68	+31.38	+3.67
100	2	1452.20	1520.53	+68.33	+4.71
180	1	1194.59	1256.64	+62.05	+5.20
230	1	1885.74	1979.24	+93.50	+4.96
400	1	5410.61	5754.90	+344.29	+6.37

在短距离(10~50 m)进行激光变焦时发散角调整范围大(10 mrad $\rightarrow$ 3 mrad), 但误差相对较低(1.74%~4.49%), 表明变焦系统在快速调节时仍能保持较高精度, 但是仍有误差增幅, 可能与镜头组动态响应延迟有关。而在中远距离(100~400 m): 进行激光变焦时发散角固定为 1~2 mrad, 但误差随距离增大(4.71%~6.37%), 主要原因为光斑面积随距离平方增加, 测量误差被放大并且由于大气衰减(散射、吸收)导致光斑能量分布不均匀, 影响半径测量精度。

从结果来看, 整体误差可控, 介于 1.74%~6.37%, 但随距离增加呈现上升趋势。可能原因为光学系统校准的偏差, 变焦镜头组件的机械调节精度不足, 导致发散角实际值与理论值存在微小差异。另一方面环境因素同样会造成影响, 例如大气湍流、温度变化引起的光束漂移, 以及测量时的背景光干扰。并且测量方法有局限性, 光斑边缘模糊导致半径测量误差, 尤其是远距离大光斑, 对实验结果干扰严重。

本系统设计的激光变焦镜头能够根据目标距离调整发散角(1~10 mrad), 光斑面积与理论值误差 < 7%, 满足非致命拒止系统的功率密度控制需求。在 100 m 内, 误差 < 5%, 系统具备较高的实用性, 而超过

200 m 时,则需要改变系统的另外一个重要参数:出射激光输出功率,使到靶激光功率密度在合理范围内以达成拒止效果。

4.3. 到靶功率密度控制

在 532 nm 半导体激光拒止器的实验中,测试系统能否根据测距模块获得的距离数据计算到达目标距离的光斑尺寸和输出功率,使激光发射系统自动调整激光参数,是否随着不同目标距离的改变而改变激光输出功率与激光发散角,对应不同的目标距离改变输出功率从而改变达到拒止效果。考虑到大气折射率变化、空气湍流、背景光干扰等环境因素导致的误差,选择在夜间且能见度较高的环境条件下使用激光功率计测量不同目标距离的到靶激光功率,在七组不同目标距离下选用的激光参数选择的目标距离为 11 m、19 m、21 m、29 m、31 m、49 m、51 m、99 m、101 m、179 m、181 m、229 m、231 m 和 399 m 这 14 组数距离据,在到靶光斑的不同位置测量 5 次并取平均值得到平均到靶激光功率,结合测量的光斑尺寸与激光功率计探针接受激光面积的比例计算平均到靶激光功率密度,只要这 14 组数据在目标范围内,则 10 至 400 m 范围内都可以达成拒止效果。

现将 14 组数据的实际激光功率密度与理论激光功率密度做误差分析,如表 6 所示为激光功率密度的绝对误差 δ 与相对误差值 Δ 。通过分析可得,在短距离(<100 m)条件下相对误差在 2.26%~6.30%,主要因光斑边缘测量误差或环境扰动。而在中远距离(>100 m)条件下误差显著增大(10.20%~27.47%),原因可能为大气衰减未完全补偿:能见度变化导致实际透过率低于理论模型。或是发散角控制偏差,由于变焦镜头机械精度不足,远距离微小发散角误差被放大。也有可能是激光功率波动引起输出功率不稳定。

Table 6. Error analysis of laser power density
表 6. 激光功率密度误差分析

L [m]	δ [mW·cm ⁻²]	Δ [%]
11	-0.022	-2.21
19	-0.014	-3.61
21	-0.041	-3.73
29	-0.031	-4.94
31	-0.076	-4.64
49	-0.046	-6.43
51	-0.104	-6.13
99	-0.050	-10.29
101	-0.142	-10.50
179	-0.062	-13.68
181	-0.229	-13.83
229	-0.217	-20.32
231	-0.301	-19.07
399	-0.153	-27.49

本实验所有数据均在 2.55 mW·cm⁻² 以下,表明本系统的参数控制可以有效避免过度照射。在接近最远距离 399 m 时,实际值为 0.404 mW·cm⁻²,仍然在拒止范围内,但是需警惕极端环境下的进一步衰减。

基于 532 nm 半导体激光拒止器系统通过动态调节输出功率(0.5~3 W)与发散角(1~10 mrad),在 10~400 m 范围内实现了功率密度的有效控制(实际值 0.365~1.641 mW·cm⁻²),满足非致命拒止的安全要求。主要结论如下:在短中距离(10~200 m)条件下的误差 < 10%,系统可靠性高,可直接投入实际应用;而在远距离(>200 m)条件下需优化大气补偿算法与硬件精度,以确保功率密度稳定性;而在安全性方面,全距离段功率密度未超出安全阈值,符合 IEC 60825-1 标准。

5. 结论与展望

本文设计了一种基于 532 nm 半导体激光器的自适应拒止系统,将激光测距数据与动态 PWM 调制结合,实现目标距离 - 功率密度的自动化控制,突破传统固定功率输出和发散角的局限性。并且优化了人眼安全理论,通过 532 nm 激光波长选择与功率密度精准调控,在非致命拒止效果与人眼保护之间取得平衡。实验表明,系统在 10~400 m 范围内功率密度控制误差 < 30%,安全性符合 IEC 60825-1 标准。未来工作将优化远距离大气补偿算法,并拓展多目标追踪功能,进一步提升复杂环境适应性。

参考文献

- [1] 崔洪胜, 蒋涛. 针对行人目标的激光炫目器自动调焦系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(12): 373-384.
- [2] 张振中, 陈燕. 关于激光致眩武器的发展及评价[J]. 警察技术, 2011(3): 69-72.
- [3] 张洪彪, 柳方明, 马超族. 激光炫目器设计研究现状及发展[J]. 工业设计, 2015(11): 105-106.
- [4] Coelho, J.M.P., Freitas, J. and Williamson, C.A. (2016) Optical Eye Simulator for Laser Dazzle Events. *Applied Optics*, 55, 2240-2251. <https://doi.org/10.1364/ao.55.002240>
- [5] 付彦辉. 人眼安全下红外激光导引头光学系统总体设计[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [6] Eberle, B. and Forster, D. (2016) Visible Laser Dazzle. *SPIE Proceedings*, Edinburgh, 21 October 2016, 99890J. <https://doi.org/10.1117/12.2241041>
- [7] 柴利飞, 郑建锋, 黄伟. 激光拒止光学系统设计[J]. 科技创新与应用, 2019(15): 1-3.
- [8] 陈芳, 赵巍, 钟春晓. ARM 嵌入式支持下高精度脉冲激光测距研究[J]. 应用激光, 2023, 43(1): 91-97.
- [9] 霍文甲. 光学成像系统嵌入式平台下的自动调焦和调光方法研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2018.