

融合光谱刺激和知觉训练的近视 防控装置设计与开发

陈宏^{1,2}, 王丽萍³, 翁杭立³, 邱飞岳¹, 廖俊³

(1. 浙江工业大学 教育科学与技术学院, 杭州 310023; 2. 浙江工业大学 管理学院, 杭州 310023;
3. 浙江工业大学 计算机科学与技术学院, 杭州 310023)

摘要: 随着电子产品的普及, 青少年儿童使用电子设备频率的不断增长, 导致青少年儿童近视率的上升; 为控制近视率的上升, 对近视早期的控制能够预防后期近视的发生, 设计开发了一种基于融合光谱刺激和知觉训练的便携式近视预防装置; 装置以基于全志 A133 主板的安卓系统控制, 采用 ESP32 无线传输模块在用户手机应用端登录后传输用户信息至服务器和装置屏幕显示, 并作为主板和灯光模块的通讯模块; 灯光模块包括一个具有恒流电源驱动的灯光系统, 该系统包含红光训练、LED 白光后像训练、RGB 多光谱训练和 LED 引导眼肌调节训练等灯光训练功能, 其中以红光训练为主要功能, 通过大小合适、光强安全、光斑均匀的低强度激光稳定照射视网膜来防止并改善眼轴长度的增加, 能够保证视网膜多巴胺的含量, 加快脉络膜、巩膜的血液循环, 从而抑制近视的发生和发展; 在进行光照训练后, 运用装置内置的 Unity 视觉训练软件, 进一步辅助眼睛的近视弱视预防; 该设计为便携式近视预防装置提供了一个新的视角, 可应用于医疗保健设备。

关键词: 近视预防; 全志 A133; 便携式; 安卓系统; 视觉训练

Design and Development of Myopia Prevention and Control Device Integrating Spectral Stimulation and Perceptual Training

CHEN Hong^{1,2}, WANG Liping³, WENG Hangli³, QIU Feiyue¹, LIAO Jun³

(1. College of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. College of Management, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

3. College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: With the popularization of electronic products, teenagers and children often use the electronic products, resulting in an increase in the rate of myopia. In order to control the increase of myopia rate, the early control of myopia can prevent the occurrence of late myopia, a portable myopia prevention device based on the integrating spectral stimulation and perceptual training is designed and developed. The device is controlled by the Android system based on Allwinner A133 motherboard, and uses ESP32 wireless transmission module to transmit user information to the server and the device screen display after logging in on the user's mobile phone application, which serves as the communication module between motherboard and lighting module. The lighting module includes a lighting system driven by a constant current power supply, which includes the functions of red light training, LED white light afterimage training, RGB multi-spectral training and LED guided eye muscle adjustment training and other lighting training functions, in which the red light training is main function. It can prevent and improve the increase in the length of eye axis by irradiating the retina steadily with a low-intensity laser with suitable size, safe light intensity and uniform spot, which can ensure the content of retinal dopamine and accelerate the blood circulation of choroid and sclera, thereby inhibiting the occurrence and development of myopia. After lighting training, the built-in Unity vision training software is used to further assist in the prevention of myopia and amblyopia. The design provides a new perspective for portable myopia prevention devices, and it can be applied in healthcare equipment.

Keywords: myopia prevention; Allwinner A133; portable; Android system; vision training

收稿日期: 2022-09-06; 修回日期: 2022-10-18。

基金项目: 浙江省基础公益研究项目(LGF21F020016)。

作者简介: 陈宏(1984-), 男, 浙江绍兴人, 硕士, 讲师, 主要从事智能计算和决策支持、教育信息化方向的研究。

王丽萍(1964-), 女, 浙江嵊州人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事优化理论与方法、医学图像处理、机器学习方向的研究。

翁杭立(1997-), 男, 浙江余姚人, 硕士研究生, 主要从事智能控制方向的研究。

邱飞岳(1965-), 男, 浙江诸暨人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事职业教育与教育信息化、智能教育及大数据挖掘与分析、智能控制与计算机视觉方向的研究。

引用格式: 陈宏, 王丽萍, 翁杭立, 等. 融合光谱刺激和知觉训练的近视防控装置设计与开发[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(5): 139-145, 152.

0 引言

随着中国青少年学业压力与日俱增,电子产品使用量的增长,用眼过度问题的日益严重导致了青少年眼睛视疲劳甚至近视的现象。然而在出现视疲劳或者轻微近视时不注意及时放松眼睛,会导致眼睛近视越发严重。令人不安的是,青少年得近视患病率越来越高,尤其是在亚洲地区,一些发达城市地区的有 80%~90% 的青少年患有近视^[1]。依据目前的估计,到了 2050 年,世界上几乎会有一半的人口患有近视^[2]。

在大量动物模型研究中表明,视网膜多巴胺功能的变化对近视的发展至关重要^[3],在文献 [4] 的研究实验中得出了视网膜多巴胺能够抑制形式剥夺性近视和晶状体引起的近视。视网膜多巴胺水平和新陈代谢随着强光的增加而增加^[5],在户外光照条件下花更多时间的儿童更不容易近视或近视加深,临床试验表明,有意增加儿童在户外的时间可以有效地减少近视^[6]。

在婴儿恒河猴实验中表明,色彩在灵长类动物的视觉依赖性正视化中发挥作用,窄带长波长照明可以防止轴向伸长^[7]。一项回顾性研究表明,在眼镜重复暴露于 650 nm、低强度、单波长的红光可以有效地减缓近视的进展,并在短期治疗后可减少轴向的生长^[8]。在^[9]的研究中表明,使用台式光治疗设备对 4 毫米瞳孔发出红光,在对儿童 12 个月的治疗表明,反复低水平红光疗法是一种很有希望的替代治疗方法,用户接受度良好,可用于儿童近视控制,且实验中没有功能或结构损伤的记录。

前文学者的研究可知使用低能量激光训练眼睛可以缓解并甚至改善近视,但是入射激光的输出能量和光斑大小稳定一直是需要持续发展的重要问题。激光能量太大可能会损害人眼视力,太小可能会使近视训练效果达不到预期;激光照射在人眼的光斑太大,会使只有部分光斑进入视网膜,导致进入视网膜得激光功率太小,也会使训练效果无法达到预期。针对激光稳定问题,可分为内调制和外调制。内调制中,刘先龙^[10]通过分析激光器输出功率与驱动电流的特征曲线,提出了一种在电路上采用压控电流的方法,实现了稳定光源的输出光功率步进可调。冷亚洪^[11]设计基于嵌入式技术的激光功率自动控制系统采用 PWM 算法完成系统软件运算控制,采用单片机功率控制方法增强激光器功率控制的稳定性,实现激光器功率的自动控制。外调制中,靳刚等^[12]根据声光频移器的布拉格衍射对激光强度的调节作用,以光电反馈得到的反馈电信号控制驱动声光频移器的射频功率大小。曲正等^[13]在闭环控制回路中引入限幅加速度惯量反馈和扩张状态观测器复合的优化算法,保证机载激光通信平台对瞬态阶跃响应的稳定性,优化了平台对环路各阶扰动的抑制能力。白乐乐等^[14]通过比例积分电路得到的误差信号来改变声光频移器的射频功率,利用声光频移器的布拉格衍射方式对激光功率进行控制。然而上述方法使用有源电路,需要在原有电路基础上构建额

外的电路或装置,基于固定的空间内会占据较大的体积,对于便携式近视预防装置来说是不理想的。

基于上述已有的研究,为促进近视预防这一课题的发展,并考虑到便携式的需求,需要在有限空间内能够稳定输出光源,本文设计了一种近视预防装置,该装置又称为哺光仪。装置使用恒流电源与匀光片组合的方式,在分散光能量的同时,保持稳定的能量输出。装置以 Android Studio 和 Arduino 作为开发环境,以全志 A133 芯片开发板作为上位机,结合灯光模块实现训练灯光的控制,使用 ESP32 进行手机和装置以及上位机和灯光模块的通信,在用户登录后将用户信息传输给装置屏幕端显示,并同时装置内的训练记录通过手机上传至服务器,实现训练记录的云端存储。装置搭载各种近视弱视的物理光训练功能的灯光模块以及视觉训练软件模块,与其他近视预防装置不同,哺光仪视觉预防以视觉刺激为主。本装置灯光模块中的主要训练功能为红光训练,采用恒流原理的方法以恒流电源作为驱动单元,在灯光模块前放置匀光片,匀光片使灯光模块中的激光光斑扩散的同时,衰减输出的激光功率。本文使用的激光功率最大为 0.4 mW、波长为 650 nm 的红光,符合我国激光照射视网膜的国家标准^[15]。

1 系统结构及原理

本文设计装置是一种外部由塑料壳体包围封闭,内部由电路控制板和治疗光源等组成的近视预防训练装置。该装置的供电方式主要有 5 V/2 A 的外接电源和 12 000 毫安的电池,方便出行使用。内置可调节灯筒结构,可以根据使用患者的瞳距左右活动灯筒,以达到瞳距和灯筒的最佳训练位置,具有使用方便简单、功能丰富、输出稳定安全的特点。

哺光仪总体结构框架图如图 1 所示,装置外形图如图 2 (a) 所示,哺光仪由装置端和手机 App 端两部分组成。其中装置端以 ARM 为开发平台,由全志 A133 主控芯片、显示模块、通讯模块、灯光模块等硬件和安卓 APP 软件构成。通讯模块接收和发送主控芯片—手机 APP、主控芯片—灯光模块之间的通讯数据;灯光模块接收来自主控芯片经由通讯模块发送的指令执行对应灯光训练功能;安卓 APP 通过屏幕操控向主控芯片发送对应功能指令。手机 APP 的主要功能是在用户使用账号登录后,通过蓝牙向装置通讯模块中的 ESP32 芯片传输用户数据,将相关用户数据显示在装置屏幕中的用户界面中,同时在训练后将内部的训练记录信息发送给手机 APP,在手机中同步显示该装置训练记录的同时,将训练信息发送至服务器保存,以便在手机 APP 中查看历史训练记录,其中装置的训练记录图如图 2 (e) 所示。主控芯片全志 A133 芯片是装置硬件部分的核心,其搭载安卓系统并使用安卓 APP 作为装置的主控程序,相比于其他嵌入式控制程序来说安卓 APP 内容更加丰富,可扩展性更强,操控更加便捷,装置主界面如图 2 (b) 所示。装置 APP 具有红光训练、LED 白光后像训练、RGB

多光谱训练、LED 引导眼肌调节训练等灯光训练模块外, 还嵌入了基于 Unity 的视觉训练软件, 并设计了用户选择和训练记录功能, 其中红光训练界面如图 2 (c) 和图 2 (d) 所示, 视觉训练软件如图 2 (f) 所示, 视觉训练模块如图 2 (g) 所示。程序通过串口和通讯模块连接, 发送对应指令控制灯光模块, 并可以在使用装置进行物理光照训练后, 使用视觉训练软件进行视力训练, 帮助获得更有效的训练效果。

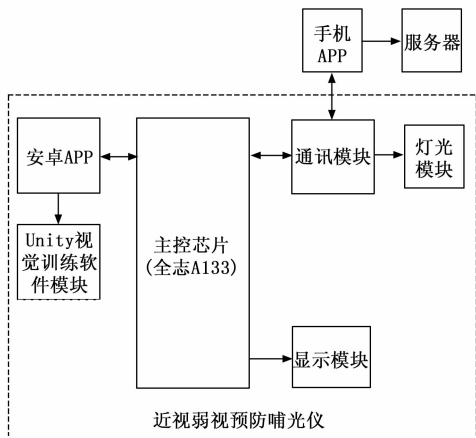


图 1 哺光仪总体结构图

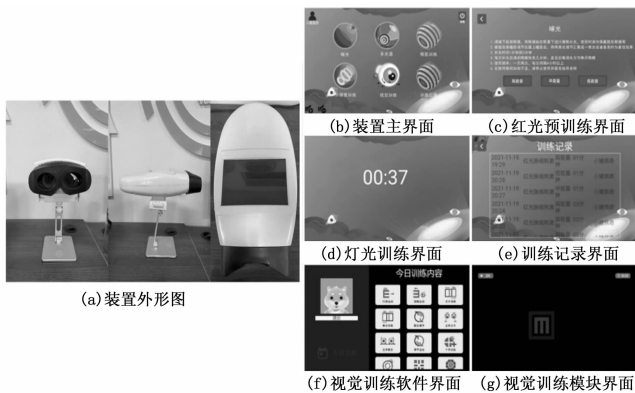


图 2 装置外形与软件界面图

2 系统硬件设计

2.1 总体方案设计

哺光仪结构紧凑, 去除支架为装置本体, 装置长宽高分别为 33.3 cm, 21 cm, 9.6 cm。外形设计初衷为方便携带, 可在任何地方进行视觉训练。根据装置总体功能要求, 在硬件部分由主控模块、通讯模块、灯光模块和显示模块构成。

2.2 主控模块

主控模块是整个装置的控制中心, 负责与通讯模块进行数据交互, 指令解析, 驱动显示。本文使用全志 A133 处理器为哺光仪近视预防装置的主控芯片, 它集成了 quad-core 64-bit CortexTM-A53 CPU 和 Imagination PowerVR GE8300 GPU 确保了响应的迅速性和应用运行的流畅性。

主控电路设计如图 3 (a) 所示。模块提供 MIPI-DSI/RGB/LVDS 面板、USB、UART 等丰富的外设接口, 可满足本设计控制系统的所有需求。PB0 和 PB1 两个引脚分别与 ESP32 通讯模块的 ESP32_RX1 (IO17) 和 ESP32_TX1 (IO16) 引脚相连, 实现上位机与下位机间的通信。24 号引脚连接 POWERKEY 电源控制引脚, 用于控制设备开关机。PD2-PD15 以及 PD18-PD23 连接液晶显示屏 (LCD) 数据引脚, PD24 连接 LCD_CLK 时钟信号, PD25 连接 LCD_DE 数据使能引脚, PD26 与 PD27 分别连接 LCD_HSYNC 水平同步信号与 LCD_VSYNC 垂直同步信号引脚。PB3 连接通讯模块的 EN 使能引脚, 用于控制通讯模块。

2.3 通讯模块

本文使用 ESP32 作为下位机控制模块, 负责与上位机进行通讯和对各个灯光模块的控制。ESP32 通讯模块电路原理图如图 3 (b) 所示。它集成了 2.4 GHz WiFi 和蓝牙双模的单芯片, 具有超高的射频性能 (蓝牙输出功率 +9 dBm, 接收灵敏度 -dBm)、稳定性、可靠性以及超低的功耗^[16], 满足本设计低能耗需求。通过蓝牙可以实现与用户小程序进行数据传输和控制灯光, 也可与搭载在主控芯片上的 App 进行通信和灯光控制。

2.4 灯光模块

本设计灯光模块集成红光训练、LED 白光后像训练、RGB 多光谱训练、LED 引导眼肌调节训练模块。其中眼肌训练以及后像训练采用 3 mm LED 灯进行训练, 眼肌模块分为长条状和椭圆状, 长条状为灯光前后移动, 椭圆状为 RGB 灯光围绕眼睛环形移动; 后像模块呈圆状, 白色 LED 灯闪烁; 多光谱模块呈圆状, 灯光由三组 RGB 灯光交替显示; 红光训练使用波长为 650 nm 激光对眼睛进行刺激。其中呈圆状的红光模块、后像模块和多光谱模块集成在如图 4 所示电路板中, 将 3 个训练功能使用的灯光合成为一个模组上, 实现光训练功能模块在有限的空间放置, 符合节约空间和不影响视觉训练的要求。

2.4.1 红光训练模块

半导体激光器又称激光二极管, 其作为主动光源的优点突出, 具有方向性好, 单色性高、结构简单、体积小、寿命较长等优点。激光的产生必须选择合适的工作介质, 可以是液体、气体、固体和半导体, 在介质中实现粒子数的反转, 以获得产生激光的条件^[17]。半导体激光器在电激励模式下, 不考虑工作温度的情况时, 外加电压小于阈值电压, 半导体激光器结平面区不产生受激辐射, 而为自发辐射, 与普通的发光二极管 (LED) 类似。当外加电压达到阈值电压, 半导体激光器产生受激辐射, 发射的激光功率与注入电流大小近似成线性关系^[18]。

基于眼科学者对红光与近视预防的研究, 本设计灯光模块中的红光训练功能使用 650 nm、低强度、单波长的激光。

2.4.2 匀光片及光斑

匀光片又称作匀化镜、扩散器或匀化片, 可以将单模

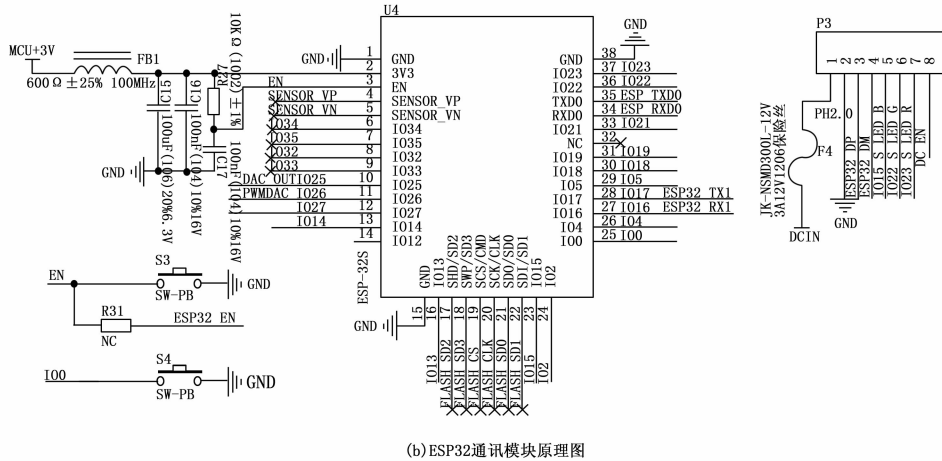
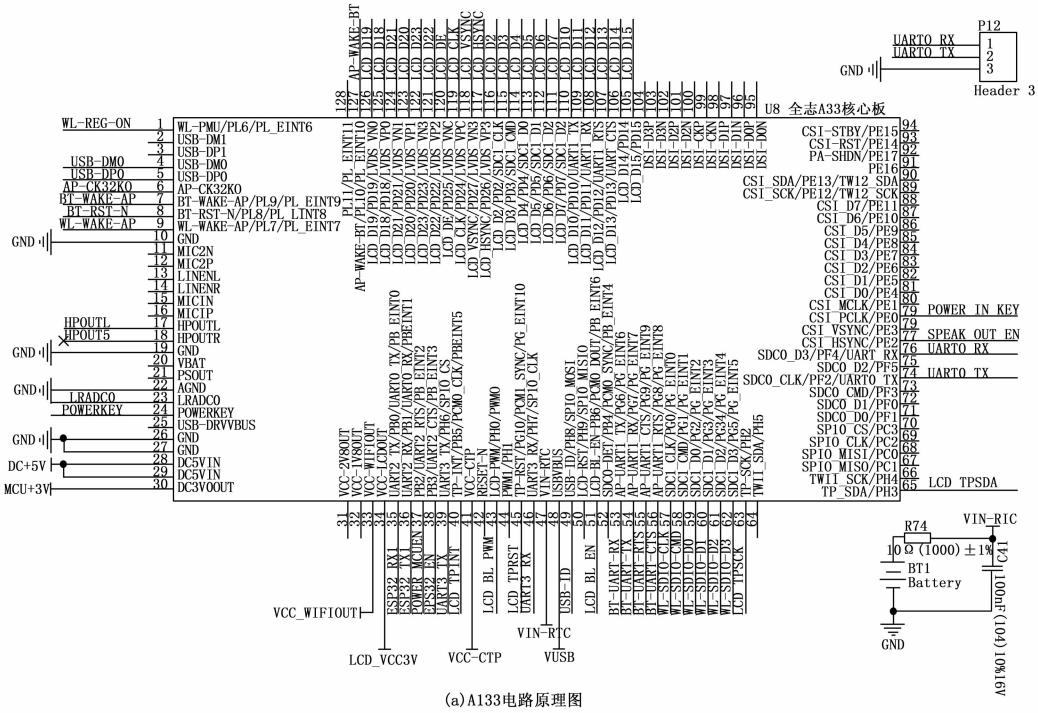


图 3 部分电路原理图

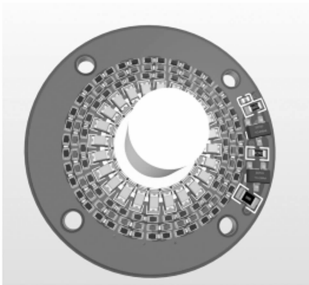


图 4 部分灯光训练模组图

或多模入射激光转化成任意形状的统一光斑。匀光片在随机方向上分裂入射光束，以便在远场或焦平面上获得所需要的强度分布形状。

选择匀光片的参数有：

- 1) 入射激光波长；
- 2) 输出光斑形状和强度分布（平顶光斑或定制）；
- 3) 输出光斑的发散全角或光斑尺寸大小或工作距离 EFL；
- 4) 入射激光光束质量 M2。

本设计在圆状灯光模组前放置一块匀光片，分散激光射出光线，增大激光光斑的同时减小激光的强度分布，使在训练时红光可以均匀分散在视网膜上。

2.5 显示模块

液晶材料在不同的电场作用下，可以产生不同的排列方式，通过电流改变光的震荡方向。薄膜晶体管（TFT）薄膜晶体管是一种半导体器件，它具备 MOSFET 类似的电流-电压特性，可以产生一个相当于控制开关的作用改变液晶显示^[19]。

本设计显示模块采用 7 寸 TFT 液晶显示屏, 具有 4 通道 LVDS 接口、8 位色深、低驱动电压以及低功耗等特性。

3 系统软件设计

3.1 程序设计

装置主程序基于安卓 6.0 系统开发, 使用安卓 APP 作为主控程序, 程序流程图如图 5 所示。具体的主控程序流程是: 首先初始化程序内部的参数和串口, 显示主界面, 根据用户选择红光训练、LED 白光后像训练、RBG 多光谱训练、LED 引导眼肌调节训练等灯光训练或是视觉训练软件进入不同的程序子界面, 若为灯光训练则进入训练介绍和计时界面, 待用户选择训练时长和训练灯光强度后点击开始训练后, 主控芯片向通讯芯片发送相关指令, 屏幕开始计时的同时装置对应灯光模块的训练灯光亮起, 等待计时结束完成训练; 若为视觉训练软件训练则进入 Unity 程序子界面, 界面显示多个软件训练模块, 待用户选择训练时长等参数后即可开始进行视觉训练, 待计时结束完成训练; 训练完成后将训练记录保存在本地, 并串口询问通讯模块蓝牙是否连接, 若连接则将训练数据发送至手机。

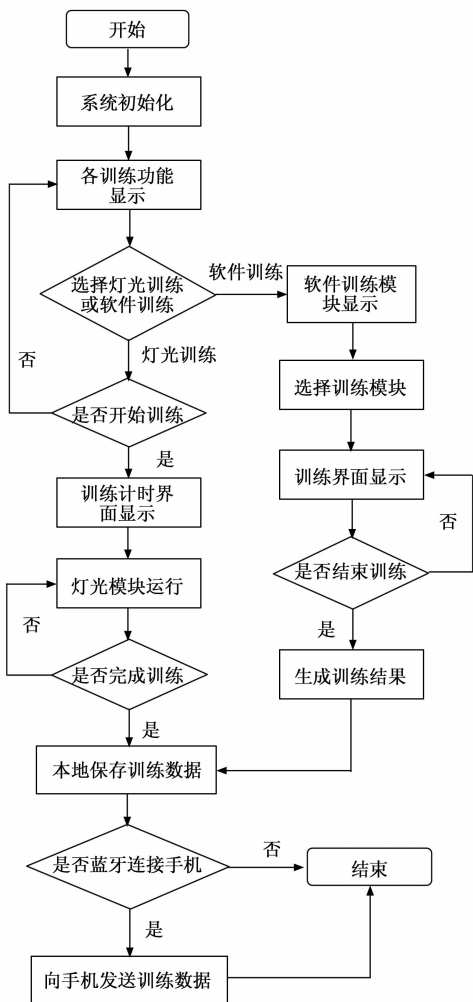


图 5 主控程序流程图

主程序对灯光模块的控制采用串口与通讯模块的交互, 串口通讯采用 9 600 的波特率, 当通讯模块接收到相应指令后进行解析执行灯光模块相关功能。灯光训练时主控程序控制灯光模块的流程图如图 6 所示。当用户点击屏幕中“开始训练”按钮时, 程序通过串口向通讯模块发送相关指令, 若程序接收到串口回复的正确返回, 则灯光模块开始运行, 且屏幕中开始计时, 否则程序重发相关指令, 若重发 3 次后未收到正确返回, 则异常处理在屏幕中显示错误信息并返回主界面。

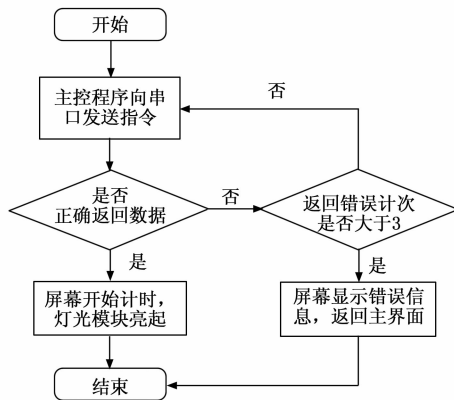


图 6 主控程序灯光模块控制流程图

主程序使用通讯模块中蓝牙芯片向手机发送训练信息流程, 通过蓝牙实现向手机的无线数据传输, 提高了装置的实用性并方便用户通过手机查看训练记录。主程序将训练记录和日期等信息经过十六进制的字节转换后, 通过串口的形式向通讯模块发送, 每条数据带有起始标识符和校验位, 以确保传输数据的正确性。

3.2 手机 APP 设计

使用不同手机操作系统需要各自单独开发适配该系统的 APP, 导致开发周期长等缺点, 由于微信小程序可以跨系统运行, 基于微信小程序的该优点, 本文手机 APP 使用微信小程序进行开发, 且微信小程序拥有丰富的开发 API, 可大大缩短程序开发时间。调用 API 执行用户登录功能, 蓝牙 API 接口实现与蓝牙设备的连接和数据传输^[20]。本文使用的微信小程序功能包括: 用户注册登录、扫描装置屏幕内二维码与装置进行蓝牙连接、通过蓝牙控制装置开始相关灯光训练、接收装置训练数据、向后台发送训练数据。微信小程序总体流程图如图 7 所示。微信小程序启动并登录后, 首先查询本地是否存在已连接装置蓝牙 MAC 地址的缓存, 若存在则进行蓝牙主动连接; 若本地没有缓存, 则进入无连接状态, 需要使用小程序扫描装置屏幕的二维码进行蓝牙连接, 并将该蓝牙 MAC 地址保存在缓存中, 以便下一次使用时主动连接。连接成功后, 小程序会开启一个线程监听蓝牙, 用户可以通过装置的屏幕进行训练项目的选择, 或通过小程序中的训练选项向装置发送指令, 装置

通讯模块接收到相关指令后会主动切换屏幕界面并开始执行相关灯光训练功能。待装置训练完成后，发送相关训练记录至手机小程序，小程序通过起始标识符判定数据种类并保存本地，在数据接收完成后将接收到的整组数据上传至服务器保存。

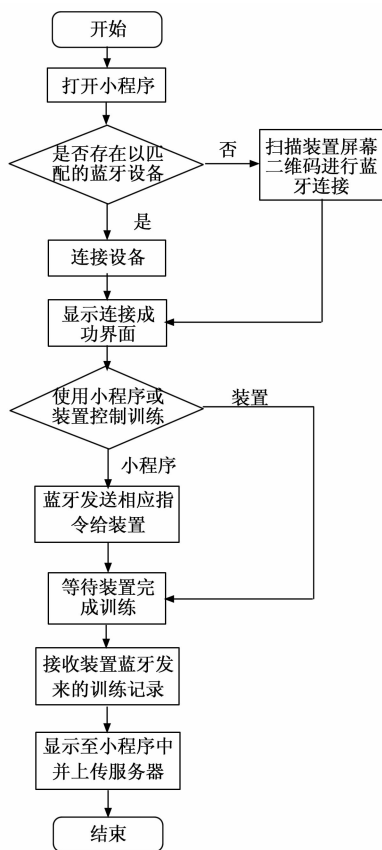


图 7 微信小程序总体流程图

4 实验结果与分析

4.1 实验方案

本装置使用安卓 APP 作为装置主控制程序，使用微信小程序与装置进行通讯，通过对装置主控程序和微信小程序的功能进行逐个运行，实现程序的功能性验证^[21]。装置主要功能为红光训练，为测试激光的稳定性和安全性，证明装置方案可行，在理论的基础上还需要进行验证，本文记录了光学防震台上装置的激光输出光斑，并对其灰度图像进行了测量。试验的光斑主要分为两类，距离镜筒长度下输出的激光光斑和加入匀光片后输出的激光光斑，其中激光在 22 mA 恒电流源下使用。光斑使用 Thor labs 科研级相机进行拍摄，灰度图像由 image J 软件进行测量。

4.2 装置功能与可靠性验证

系统的功能验证和可靠性验证是查看系统是否具备完整的功能且系统运行时是否稳定^[22]。本文对装置的测试用例和结果如表 1 所示。

4.3 激光实验结果分析

实验中测试了装置中的三档能量激光能量，分别为低能量 (0.2 mW)、中能量 (0.3 mW) 和高能量 (0.4 mW)，通过激光功率计对射出的激光光斑进行功率测量，结果符合预期功率。激光光斑像如图 8 所示。

表 1 装置的测试用例与结果

测试动作	预期结果	实际情况
微信小程序蓝牙连接装置	装置是否正确接收到蓝牙成功连接成功时发送的数据	装置正确接收到蓝牙数据
逐个点击装置屏幕中所有灯光训练功能按键	装置通讯模块是否正确接收各功能对应指令并运行对应灯光模块；微信小程序是否能够接收训练记录；微信小程序是否正确发送数据至后台服务器	通讯模块正确接收到指令，对应灯光模块按照指令指定强度和训练时间开始运行；在训练结束后微信小程序能够正确接收到对应训练的记录；服务器正确接收到小程序发送收据并显示在数据库中
运行装置视觉训练软件并运行软件内各个视觉训练模块	视觉训练软件是否能够流畅运行成功，训练模块是否能够完成训练并给出训练结果	视觉训练软件可以流畅运行，训练模块在规定时间内完成后能够给出训练结果
微信小程序控制装置进行训练	装置屏幕是否能够进入训练界面并控制灯光模块开始训练	装置屏幕显示对应训练界面，灯光模块成功运行对应训练功能

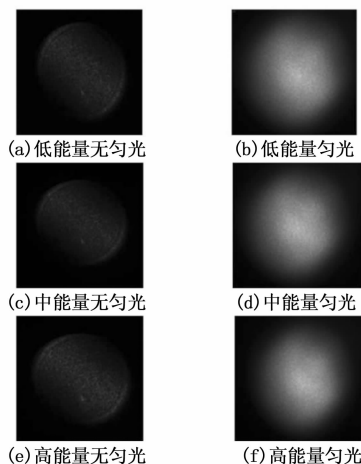


图 8 装置激光光斑灰度图像

从图 9 中可以看到，在无匀光片时，激光光斑呈斑点状，边缘陡度较陡；加入匀光片后，光斑与未加匀光片有明显不同，呈较均匀状，边缘陡度平缓。图 9 为 3 种不同功率下激光光斑的一维光强分布。从图中可以看出，在未加匀光片时，光强分布及其不均匀。再加上匀光片后，强度分布变得更加均匀，运动幅度和标准差相比不加匀光片的图来说更小。图 10 为 3 种不同功率下激光光斑的光强分布直方图，横坐标为光的强度，纵坐标是对应光强的像素点

数量。从图中可知, 在未加入匀光片时, 光强的分布聚集于一侧, 且光强的分布较广。加入匀光片后, 光强的分布变得更加均匀, 且光强分布范围缩小。

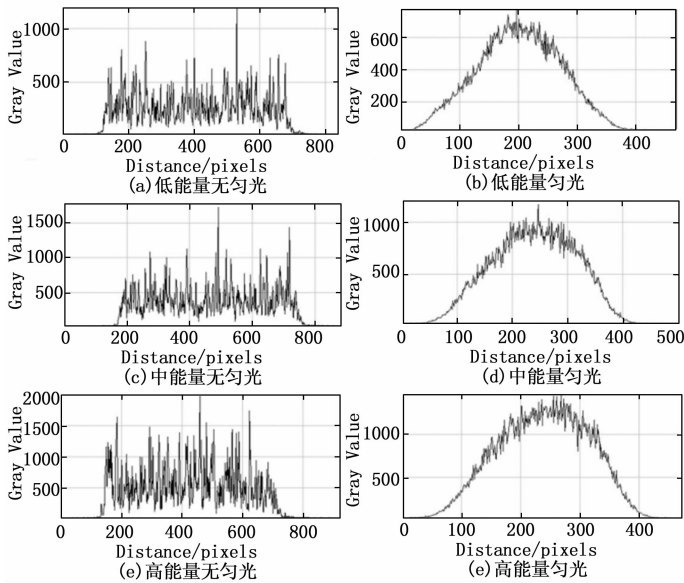


图 9 装置激光光斑强度分布

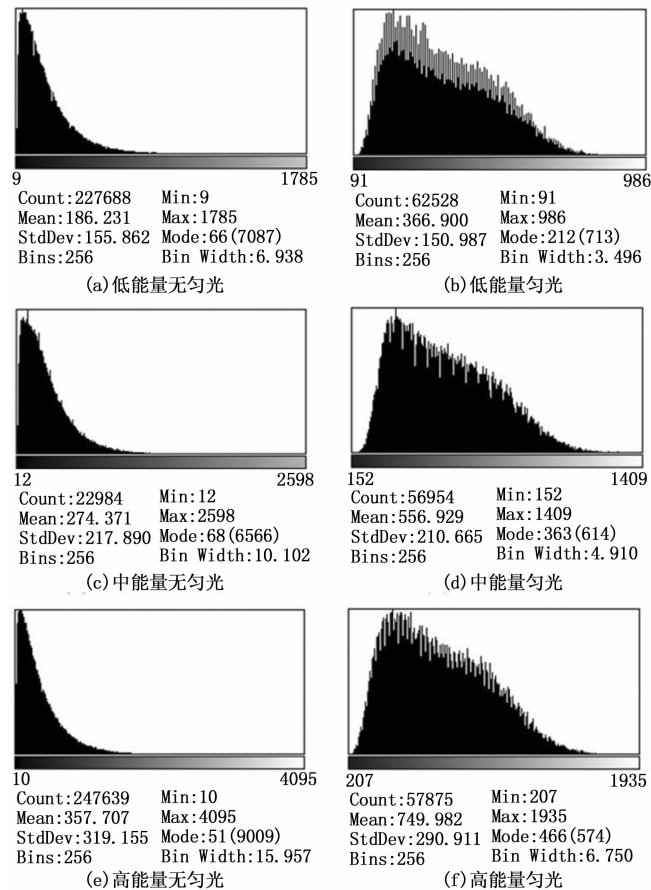


图 10 装置激光光斑强度分布直方图

5 结束语

本文针对目前青少年近视患者数量的上升, 视觉预防

训练需求的不断增加, 调研现有的近视预防产品, 确定了需求和所需功能后, 从而提出设计一个近视预防的新方法, 实现了一种哺光仪近视预防装置。装置内搭载红光训练、后向训练、多光谱训练、眼肌训练、视觉训练软件等多种训练模式, 并可用手机 APP 基于蓝牙通信进行控制, 具有携带方便、可随时训练、训练功能丰富等特点。装置使用 5 V/2 A 电源供电, 并使用恒流电源作为灯光模组的供电模块, 保证灯光训练的稳定性和安全性。装置测试效果符合预期的设计要求, 在近视预防领域中具有较大的应用价值。

基于本文的研究成果, 计划在后续的研究中增加实际使用效果, 通过在真实的医学测试中对装置的有效性进行评估, 根据测试数据和相应效果, 以便后续对装置进行更好的迭代。

参考文献:

- [1] CHAKRABORTY R, OSTRIN L A, NICKLA D L, et al. Circadian rhythms, refractive development, and myopia [J]. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 2018, 38 (3): 217-245.
- [2] HOLDEN BA F T, WILSON DA, ET AL. Global Prevalence of Myopia and High Myopia and Temporal Trends from 2000 through 2050 [J]. *Ophthalmology*, 2016, 123 (5): 1036-1042.
- [3] TROILO D S E R, NICKLA DL, et al. IMI-Report on Experimental Models of Emmetropization and Myopia [J]. *Investigative ophthalmology & visual science*, 2019, 60 (3): M31-M88.
- [4] THOMSON K, KAROUTA C, ASHBY R. Form-Deprivation and Lens-Induced Myopia Are Similarly Affected by Pharmacological Manipulation of the Dopaminergic System in Chicks [J]. *Investigative ophthalmology & visual science*, 2020, 61 (12): 4.
- [5] LANDIS E G, PARK H N, CHRENEK M, et al. Ambient Light Regulates Retinal Dopamine Signaling and Myopia Susceptibility [J]. *Investigative ophthalmology & visual science*, 2021, 62 (1): 28-28.
- [6] HE M, XIANG F, ZENG Y, et al. Effect of Time Spent Outdoors at School on the Development of Myopia Among Children in China: A Randomized Clinical Trial [J]. *JAMA*, 2015, 314 (11): 1142-1148.
- [7] HUNG L-F, ARUMUGAM B, SHE Z, et al. Narrow-band, long-wavelength lighting promotes hyperopia and retards vision-induced myopia in infant rhesus monkeys [J]. *Experimental Eye Research*, 2018, 176: 147-160.
- [8] ZHOU L, XING C, QIANG W, et al. Low-intensity, long-wavelength red light slows the progression of myopia in children: an Eastern China-based cohort [J]. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 2022, 42 (2): 335-344.
- [9] JIANG Y, ZHU Z, TAN X, et al. Effect of Repeated Low-Level Red-Light Therapy for Myopia Control in Children: A Multicenter Randomized Controlled Trial [J]. *Ophthalmology*, 2022, 129 (5): 509-519.

(下转第 152 页)