

# 国家卓越工程师学院明月科创实验班

## 《自动控制原理》台灯方案报告



组 号：\_\_\_\_\_ 第 3 组 \_\_\_\_\_

姓 名： 郝博文，赵江涛，何怀骋，唐晨

学 号： 20234021，20232662，20235399，20235025

年 级： \_\_\_\_\_ 23 级 \_\_\_\_\_

班 级： \_\_\_\_\_ 2 班 \_\_\_\_\_

重庆大学国家卓越工程师学院

2025 年 1 月

# 目录

一、项目概述	1
1.1 设计要求	1
1.2 设计目标	1
1.3 适用场景	2
二、设计思路	2
2.1 核心设计逻辑	2
2.2 技术路线	3
2.3 难点分析与解决方案	3
三、台灯结构设计	4
3.1 整体结构组成	4
3.2 各模块详细设计	5
3.2.1 底座模块	5
3.2.3 灯头模块	6
3.3 整体效果	7
四、控制方案设计	8
4.1 控制核心架构	8
4.2 电源电路设计（BUCK 变换器）	8
4.2.1 拓扑结构	8
4.2.2 关键参数设计	9
4.2.3 调光原理	9
4.2.4 反馈控制设计（双环控制）	10
4.3 上层电路设计（云台系统）	10
4.3.1 拓扑结构	10
4.3.2 电机控制原理	11
4.3.3 反馈控制设计（三环控制）	11
4.4 控制算法设计	13
4.5 人机交互设计	13
五、无影灯设计方案	14
5.1 无影设计原理	14
5.2 光源阵列设计	14
5.2.1 光源布局	14
5.2.2 光源角度调节	14
5.3 光学组件设计	15
5.3.1 扩散透镜	15
5.3.2 反光材料	15
5.4 无影效果验证	16
六、系统调试与性能验证	16
6.1 硬件调试	16
6.2 软件调试	17
6.3 性能验证	18
七、成本预算与物料清单	20

# 多模态台灯小桌宠（含 BUCK 恒流调光）设计方案

## 一、项目概述

### 1.1 设计要求

（1）**柔光照明与多档位亮度**：采用多点光源+亚克力均光板形成大面积柔光，亮度支持三档（暗/正常/亮），且无明显闪烁。

（2）**亮度闭环稳定**：以同步 BUCK 恒流驱动 LED，采样电阻电流反馈，控制器进行 PID 调节，实现输出恒流稳定。

（3）**自学习跟随**：视觉框选目标（如电路板/书本/手部）后无需训练即可跟随，保证“指哪儿照哪儿”。

（4）**手势识别**：台灯通过视觉模块识别用户手势并进行相应动作，如“five”代表跟随，“ok”代表停止，实现无接触控制台灯。

（5）**多模态无感交互**：支持离线语音识别（开关灯/亮度档位/风扇模式），支持手势识别调节云台姿态与锁定位置。

（6）**情绪识别与桌宠表达**：人脸情绪识别后，台灯通过灯光与姿态动作+OLED 表情做出反馈，提供情绪价值。

（7）**焊接辅助**：集成小风扇，辅助抽走焊接时产生的烟雾和废气，提高焊接舒适度。

### 1.2 设计目标

- **光照性能**：在桌面 1 m 以内提供均匀、柔和的大面积光域；通过均光板降低眩光并实现无影灯效果。
- **调光功能**：基于同步 BUCK 恒流驱动与闭环 PI/PID 控制，支持三档亮度，并支持语音指令切换模式。
- **多功能辅助**：通过自学习跟随、手势识别和语音等，自动跟随要照亮的物品，并能够通过小风扇去除焊接场景下的废气。

- **无影效果：**多 LED 点光源对称布局+扩散均光板，使照明区域从多方向受光，削弱单一阴影。
- **外观效果：**桌宠化外观（可动“脖子/头部”），OLED 表情屏与动作反馈，保证美观，兼具实用与陪伴感。

## 1.3 适用场景

①家庭学习、办公室办公、书房阅读、儿童学习区等对光照舒适度与无阴影要求较高的场景；

②实验室焊接/维修需要跟随照亮并去除废气的场景，可开启小风扇辅助抽走焊接烟雾；

③个人工作空间等对台灯的趣味性和交互性要求较高的场景，可以和台灯小桌宠互动玩耍。

## 二、设计思路

### 2.1 核心设计逻辑

#### 光照性能：

以“BUCK 电源为核心动力单元+双环控制为调光核心+多光源阵列”为无影基础，构建“感知-控制-执行-反馈”的闭环系统。通过光敏传感器感知环境光强度，结合用户设定参数，由控制器生成调光指令，驱动 BUCK 电源调节 LED 驱动电流，实现光照强度有效调节；同时通过多 LED 光源的对称布局，抵消单一光源产生的阴影，达成无影效果。

#### 多模态辅助：

以“双自由度云台+视觉识别模块+语音交互模块”为辅助照明基础，搭配 BUCK 闭环电路实现稳定方便的多模态辅助。通过双自由度云台调节照明角度，视觉模块中的自学习/手势识别实现跟随照亮，以及语音控制实现便捷高效的模式切换。

### 情感交互:

以“OLED 显示屏+无源蜂鸣器+视觉模块+双自由度云台+灯光照亮系统”为基础，形成一整套可识别用户情绪并给出响应的交互系统。OLED 显示屏可显示七种不同表情，在视觉模块通过人脸情绪识别感受到用户的情绪变化时，台灯小桌宠会做出不同动作与表情，并配上相应风格的蜂鸣器奏乐来响应用户，达成趣味交互与提供情绪价值的效果。

## 2.2 技术路线

### 光照系统:

电源输入→BUCK 变换器（DC-DC 降压）→LED 光源阵列→光照输出；同步通过视听模块串口信号→信号调理→控制器（MCU）→生成 PWM 信号→调节 BUCK 电源占空比→实现自动调光；辅以多光源光学设计与机械结构优化，完成无影台灯整体设计。

### 云台系统:

电源输入→控制器（MCU）→Pitch 轴与 Yaw 轴云台电机→相应动作；同步通过视觉模块/语音模块的串口信号→信号调理→控制器（MCU）→CAN 通信→调节电机转速或位置→实现自动跟随；辅以 PID 算法控制与机械结构优化，完成双自由度云台设计。

### 外设交互系统:

电源输入→同步通过视觉模块/语音模块采集视听信号→滤波算法→控制器（MCU）→相应的动作/光亮/OLED 表情；辅以不同通信协议与机械结构优化，完成外设交互系统整体设计。

## 2.3 难点分析与解决方案

**难点 1:** 移动供电下 LED 亮度稳定与效率。

**解决方案:** 采用同步 BUCK 拓扑降低损耗；以采样电阻电流反馈+PI/PID 闭环调节占空比，抑制输入电压与负载扰动。

**难点 2:** 云台“跟随”需要平稳、无抖动的闭环控制。

**解决方案:** 使用高精度两轴云台电机与姿态采集/滤波融合，采用串级 PID（位置-速度-电流）实现稳定跟随与姿态锁定。

**难点 3:** 多模态感知融合与低延迟交互。

**解决方案:** 视觉（目标跟踪/手势/人脸情绪）与语音均采用端侧离线方案，通过串口与主控通讯，分层任务调度保证实时性。

**难点 4:** 桌宠化表达的动作与灯光联动。

**解决方案:** 将情绪识别结果映射到“灯光模式+云台动作+OLED 表情”状态机，实现可解释且一致的反馈。

## 三、台灯结构设计

### 3.1 整体结构组成

台灯整体分为底座模块、云台模块、灯头模块三大核心部分，各部分采用模块化设计，便于装配与维护。整体建模与渲染图如下：

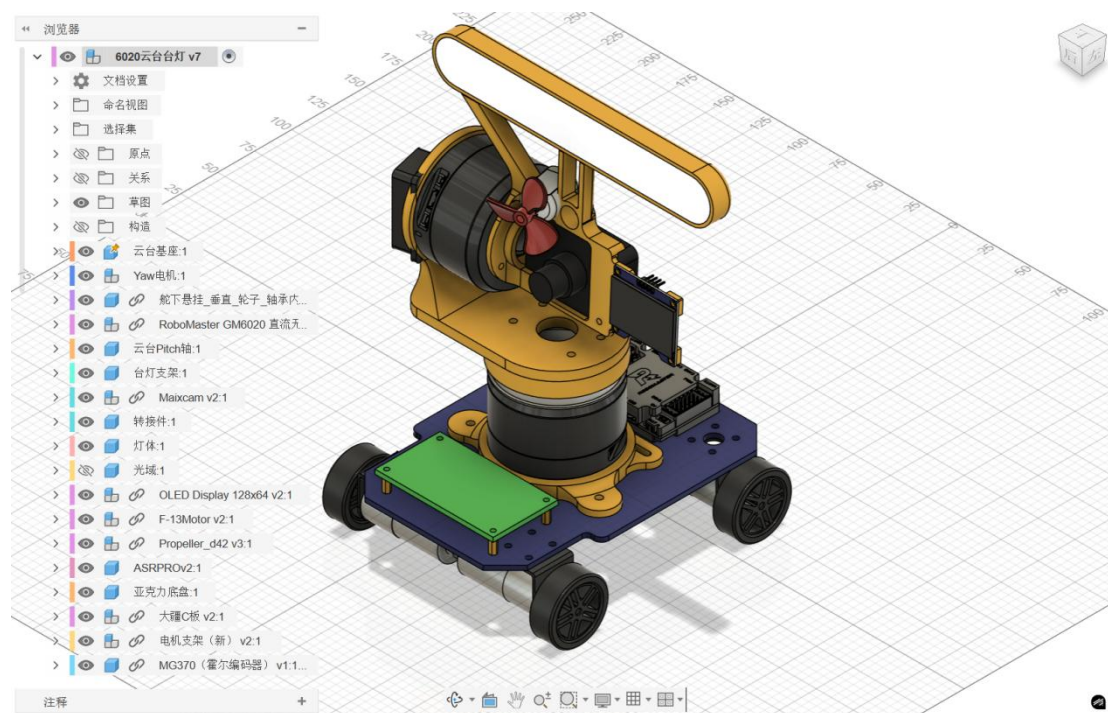


图 3.1.1 台灯建模



图 3.1.2 台灯渲染图

## 3.2 各模块详细设计

### 3.2.1 底座模块

底座集成 24V 电池与主控/从控板卡固定区，预留走线与模块安装孔位。为增强“桌宠”移动性，采用小车式轮式底盘，便于桌面小范围移动与姿态展示，并保证整体重心稳定。

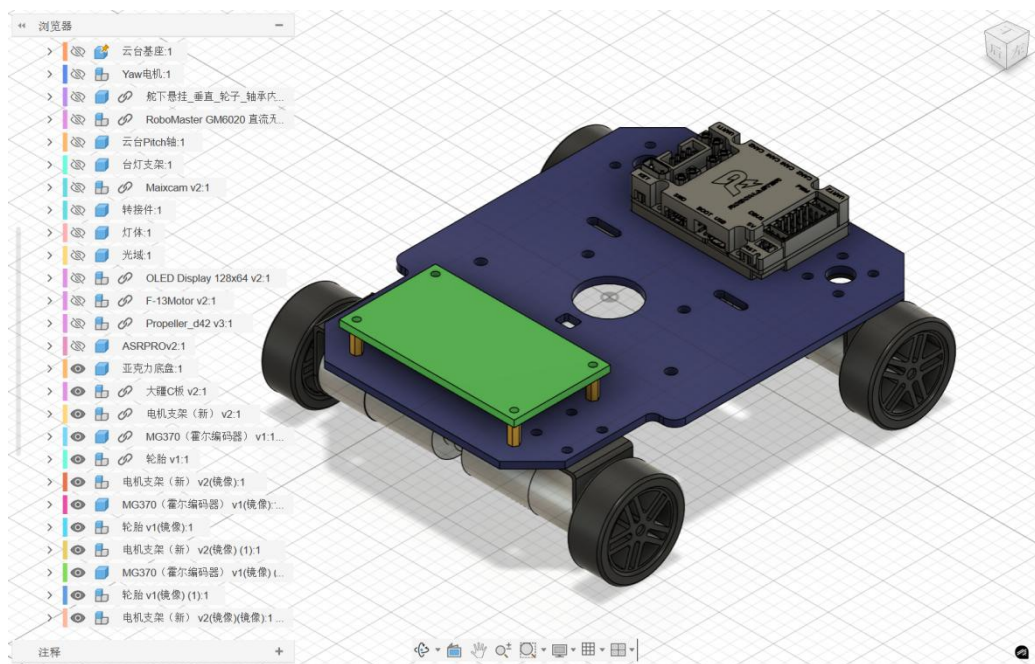


图 3.2.1.1 底座建模

### 3.2.2 云台模块

云台部分采用两轴云台结构，使用 DJI GM6020 云台电机实现俯仰/航向调节；云台侧结合姿态采集与滤波融合，并采用三环串级 PID（位置-速度-电流）闭环控制，保证跟随时平滑、定位时稳定。

云台设计的核心在于二自由度云台的协调，为了降低云台转向时 Yaw 轴带来的转动惯量，我将云台设计在底座中心，视觉模块的摄像头在 Yaw 轴电机的空心轴中心线上，消除视觉误差。整体使用打印件设计，云台建模如下：

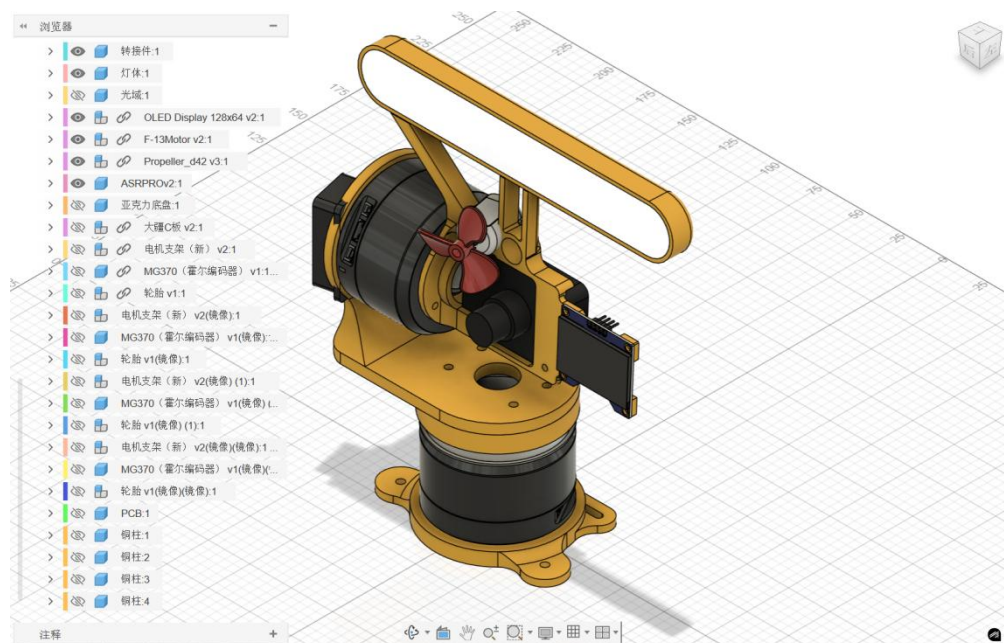


图 3.2.2.1 云台建模

### 3.2.3 灯头模块

灯头由多点 LED 光源+亚克力均光板组成，形成柔和大面积光域；集成 MaixCAM 视觉模块用于目标跟踪/手势/人脸情绪识别，集成 0.96 英寸 OLED 用于表情展示；集成小风扇用于焊接烟雾辅助抽排。

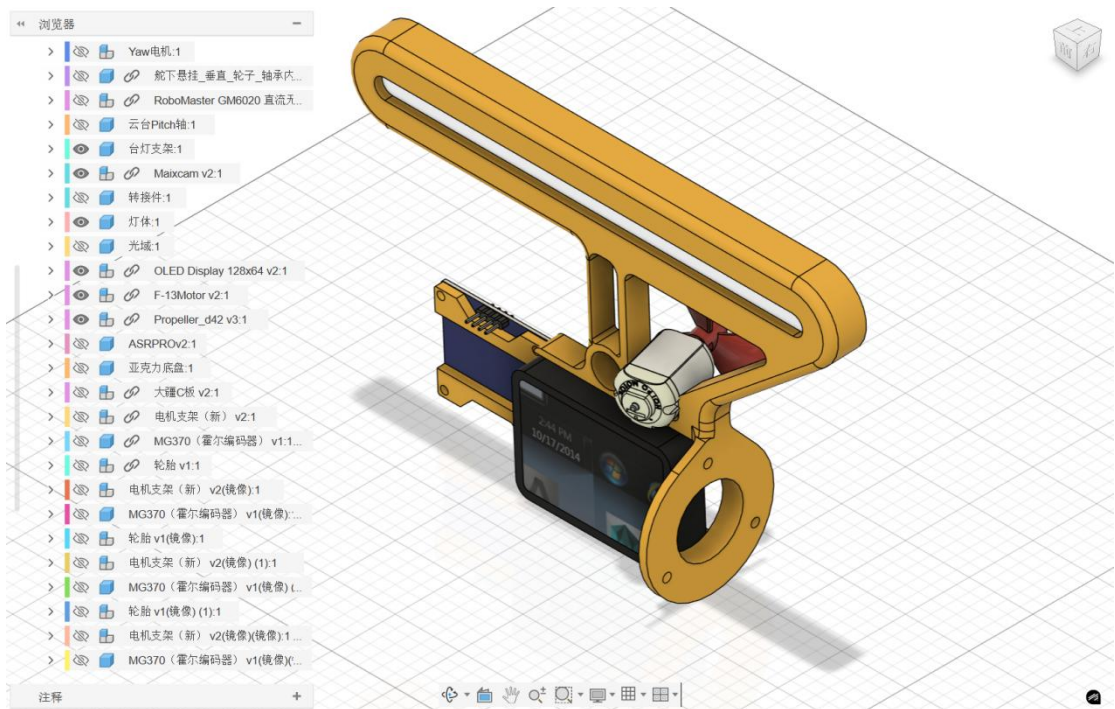


图 3.2.3.1 灯头建模

### 3.3 整体效果

整机实现“照明+跟随+交互+陪伴”一体化：在保证柔光与无影的基础上，可对目标区域自学习跟随照亮，并通过语音/手势/情绪识别进行无感交互；焊接场景下可开启风扇辅助抽排烟雾，提升操作舒适度。此外，我还通过建模软件进行了台灯的可达光域分析。

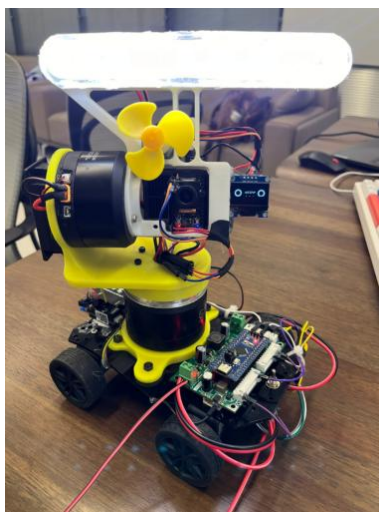


图 3.3.1 整体效果

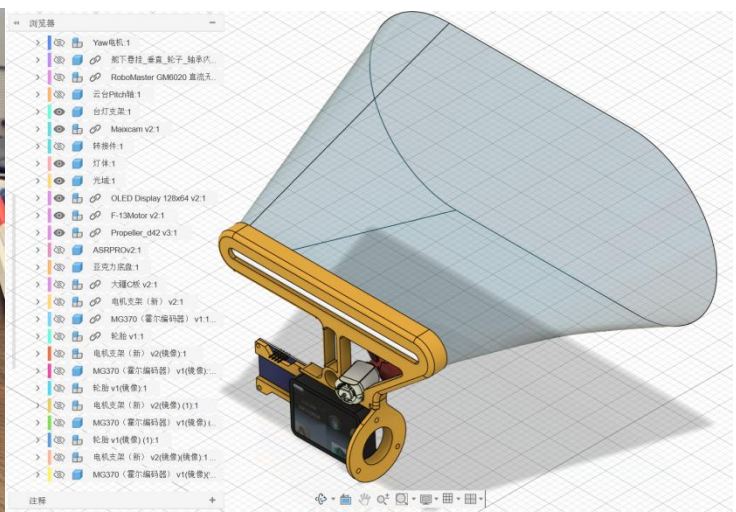


图 3.3.2 可达光域分析

## 四、控制方案设计

### 4.1 控制核心架构

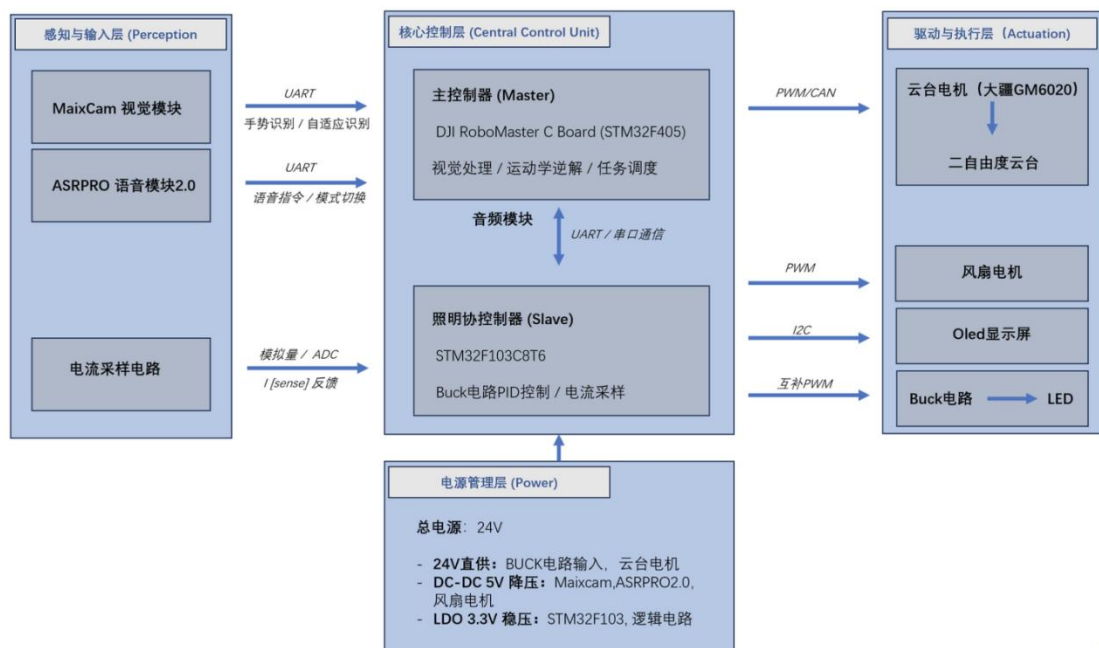
采用“多传感感知 + 主从控制 + 多执行器协同”的控制架构：

(1) **感知层**：MaixCAM 负责视觉识别（目标跟踪/手势识别/人脸情绪识别），ASRPRO2.0 负责离线语音识别；

(2) **控制层**：主控采用 DJI RoboMaster C Board (STM32F405) 进行任务调度、状态机与云台控制；从控采用 STM32F103C8T6 负责 BUCK 恒流调光与风扇/LED 等外设控制；

(3) **执行层**：两轴云台电机 (GM6020) 实现灯头指向控制，BUCK 降压恒流回路驱动 LED 实现亮度控制，小风扇用于焊接烟雾抽排，OLED 用于表情显示。

整体硬件框架如下图所示：



### 4.2 电源电路设计 (BUCK 变换器)

#### 4.2.1 拓扑结构

采用同步 BUCK 拓扑结构，由 MOSFET (Q1: 高侧开关)、MOSFET (Q2: 低侧同步整流)、电感 L、滤波电容 C 组成，相比传统异步 BUCK 拓扑，同步整流可降低导通损耗，提升电源转换效率。

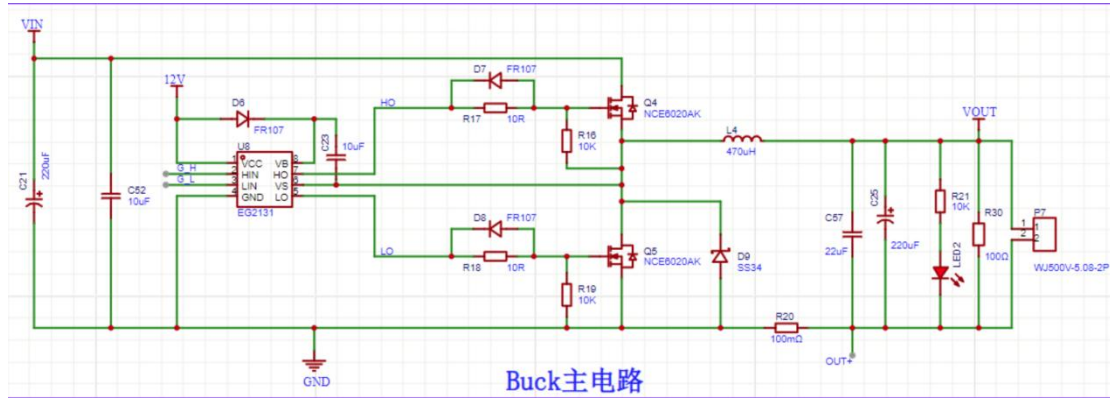


图 4. 2. 1. 1 BUCK 电路原理图

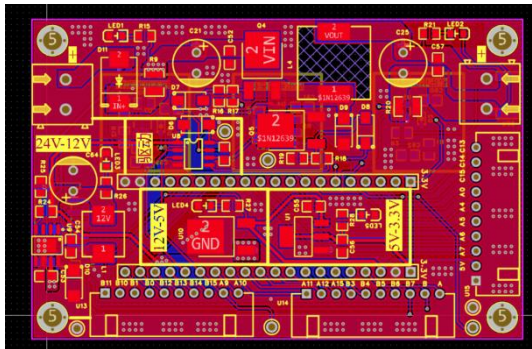


图 4. 2. 1. 2 电源模块 PCB

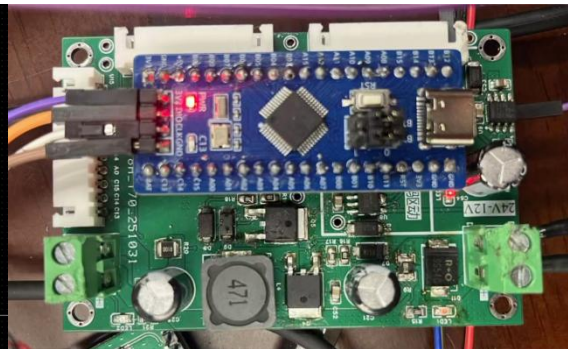


图 4. 2. 1. 3 电源模块实物图

## 4. 2. 2 关键参数设计

**输入电压:** 22.8 V (锂电池供电)，为 BUCK 降压与云台/外设供电提供母线。

**输出电压:** LED 恒流回路等效输出 (随亮度档位与负载变化)，以采样电阻电压表征输出电流并闭环控制。

**开关频率:** 由 MCU 定频 PWM 驱动栅极驱动芯片，频率选取高于可闻频段的 50 kHz，从而避免啸叫，同时兼顾效率与纹波。

## 4. 2. 3 调光原理

MCU 输出 PWM 信号，通过驱动芯片控制 BUCK 拓扑中 MOSFET 的导通与关断，

调节占空比  $D$ ，实现输出电流连续可调：当占空比增大时，输出电流增大，LED 亮度提升；反之则亮度降低。PWM 调制方式采用定频调宽，开关频率固定，避免频率波动导致的音频噪声。

#### 4.2.4 反馈控制设计（双环控制）

**内环（电流内环）：**

被控量为 LED 回路电流  $I_{out}$ （由采样电阻  $R_{20}$  两端电压换算），控制量为 PWM 占空比  $D$ ；采用 PI/PID 调节抑制输入电压与负载扰动，保证亮度稳定、无可感闪烁。

**外环（亮度/模式外环）：**

上层状态机根据语音指令、手势或情绪模式选择亮度档位（暗/正常/亮）并生成电流参考  $I_{ref}$ ；在跟随档/手势档下外环还输出云台目标角度或角速度参考，实现“指向+亮度”的协同控制。

### 4.3 上层电路设计（云台系统）

#### 4.3.1 拓扑结构

视觉/手势给“期望角度” → 姿态估计给“实际角度/速度” → 三环串级 PID 算出“电流/力矩指令” → CAN 发给 GM6020 → 电机+编码器反馈闭环。

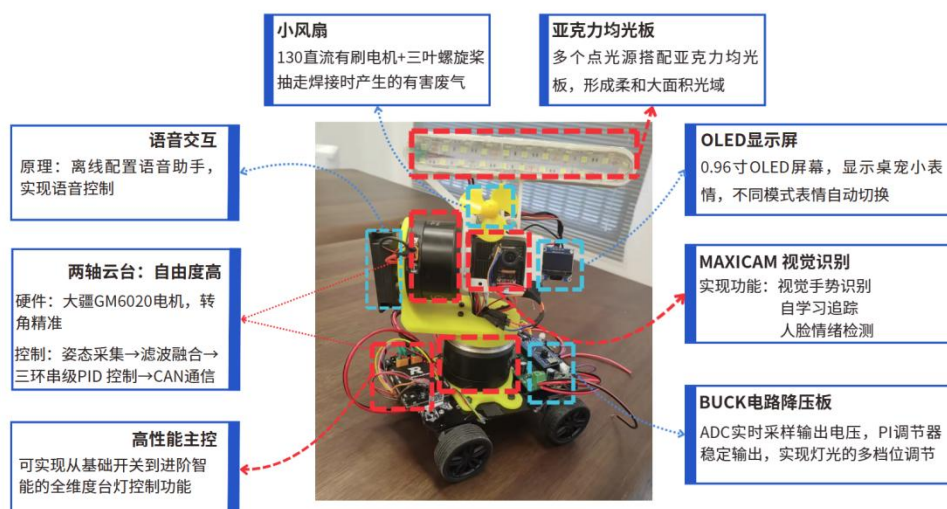


图 4.3.1.1 整体拓扑

### 4.3.2 电机控制原理

在控制设计里，GM6020 按“力矩可控的伺服执行器”来用（对外暴露的是 CAN 接口与反馈量），核心思想是：

#### I. 无刷电机力矩 $\approx$ 电流成正比

永磁无刷电机在正常工作区间可近似：

$$\tau = K_t \cdot i_q$$

也就是只要把 q 轴电流（或等效的“电流指令”）控制住，就等价于把输出力矩控制住。

#### II. 最内层是“电流环（力矩环）”+FOC/换相

工程上常见实现是 FOC（d-q 变换 + PI 电流环），用编码器估算得到的转子电角度进行正确换相；

上位控制（串级 PID）输出电流指令，底层电流环保证“指令电流能快速跟上”，从而让力矩响应很快、抗扰动强。

#### III. 为什么对云台要用“电流/力矩接口”

云台要求“转角精准、响应柔顺、抗外力扰动”，强调转角精准。若直接用“位置模式”一把抓，遇到摩擦/外力/载荷变化容易抖动；串级结构能实现：外环管精度（角度），中环管速度（动态），内环管力矩（抗扰/快速）。

### 4.3.3 反馈控制设计（三环控制）

#### 4.3.3.1 三环结构与信号定义

以单轴为例：

##### ①外环：位置环（角度环）

目标：让实际角度  $\theta$  跟踪期望角度  $\theta_{ref}$

误差： $e_\theta = \theta_{ref} - \theta$

输出：期望角速度  $\omega_{ref}$

## ②中环：速度环

目标：让实际角速度  $\omega$  跟踪  $\omega_{ref}$

误差： $e_{\omega} = \omega_{ref} - \omega$

输出：期望电流/力矩  $i_{ref}$ （或  $\tau_{ref}$ ）

## ③内环：电流环（力矩环）

目标：让实际电流  $i$  跟踪  $i_{ref}$ （从而力矩跟踪）

输出：PWM/FOC 调制量（底层驱动实现），并经 CAN 完成指令下发与反馈闭环

### 4.3.3.2 “PID1”的常用工程实现要点

#### (1) 环间带宽分离（串级能稳定的关键）

电流环最快、速度环其次、位置环最慢：电流环带宽通常比速度环快 5~10 倍；速度环比位置环快 3~5 倍。这样外环变化时，内环可以“近似瞬时跟随”，串级假设才成立。

#### (2) 每环的限幅与抗积分饱和（anti-windup）

- 位置环输出的  $\omega_{ref}$  要限幅（防止一下子要求过快转动）；
- 速度环输出的  $i_{ref}$  要限幅（保护电机/驱动/电源）；
- 积分项在饱和时停止积分或做回算，防止松饱和后大幅超调。

#### (3) 反馈量获取与滤波

- 角度  $\theta$ ：编码器积分角/IMU 融合角；
  - 角速度  $\omega$ ：优先用陀螺仪（低延迟），或编码器差分后再低通；
- 滤波融合环节“互补滤波/卡尔曼滤波实现低漂移角度估计”。

### 4.3.3.3 参数整定策略

①先整电流环（把它当作“快一阶惯性”）：提高  $K_p$  直到响应快但不抖，再加  $K_i$  消除稳态误差。

②再整速度环：在电流环已很快的前提下整速度 PI/PID，让速度跟踪快、超调小。

③**最后整位置环**：位置环一般用 P 或 PID；云台更常见“P + 速度前馈”，既稳又跟手。

## 4.4 控制算法设计

控制算法采用“电流内环 PI/PID + 上层状态机”方案：

(1) **BUCK 恒流控制**：将 BUCK 等效为二阶 LC 系统，被控量为  $I_{out}$ ，控制量为 D；采用增量式 PID/PI 对误差  $e(k)=I_{ref}-I_{out}$  进行调节，实现快速稳定的亮度输出。

(2) **云台跟随控制**：云台侧采用姿态采集→滤波融合→三环串级 PID（位置-速度-电流）→CAN 通信驱动 GM6020，实现平滑跟随与姿态锁定。

(3) **多模态交互状态机**：将语音、手势、情绪识别结果映射到“照明档位/云台动作/OLED 表情/风扇开关”等动作集合。

## 4.5 人机交互设计

**语音档**：通过语音指令直接选择三档亮度（暗/正常/亮）；

**跟随档**：视觉框选目标后，云台持续对目标进行跟随照明；

**手势档**：识别“five”时云台跟随手部位置，识别“OK”时将当前姿态锁定；

**情绪档**：识别到开心/难过/愤怒/自然等情绪时，触发灯光与动作联动（如开心闪烁并摇摆、难过变暗并低头摇头等）。

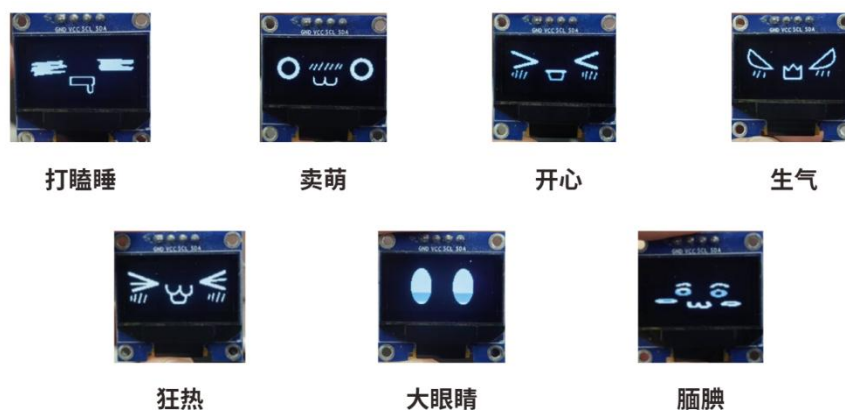


图 4.5.1 OLED 表情

## 五、无影灯设计方案



图 5.1 方案海报

### 5.1 无影设计原理

利用“多光源叠加+光线角度优化”原理，通过环形分布的多个 LED 光源，从不同方向向照射区域投射光线，使物体各部位被多个光源照亮，抵消单一光源产生的阴影；同时通过亚克力光学透镜柔化光线，降低光线对比度，进一步削弱阴影效果。

### 5.2 光源阵列设计

#### 5.2.1 光源布局

灯头内部采用多个 LED 点光源对称分布（可理解为“多点阵列”），使照明区域从不同方位受光；在焊接/写字等近距离作业中，可显著减弱手部或工具遮挡造成的硬阴影。

#### 5.2.2 光源角度调节

通过两轴云台实现灯头俯仰/航向调节：

**焊接场景：**灯光跟随电路板/焊点区域，减少手部遮挡阴影；

**阅读/学习：**根据书本/键盘位置调整入射角，避免直射眩光；

**手势模式：**用户可用手势实时调整云台指向并锁定。

## 5.3 光学组件设计

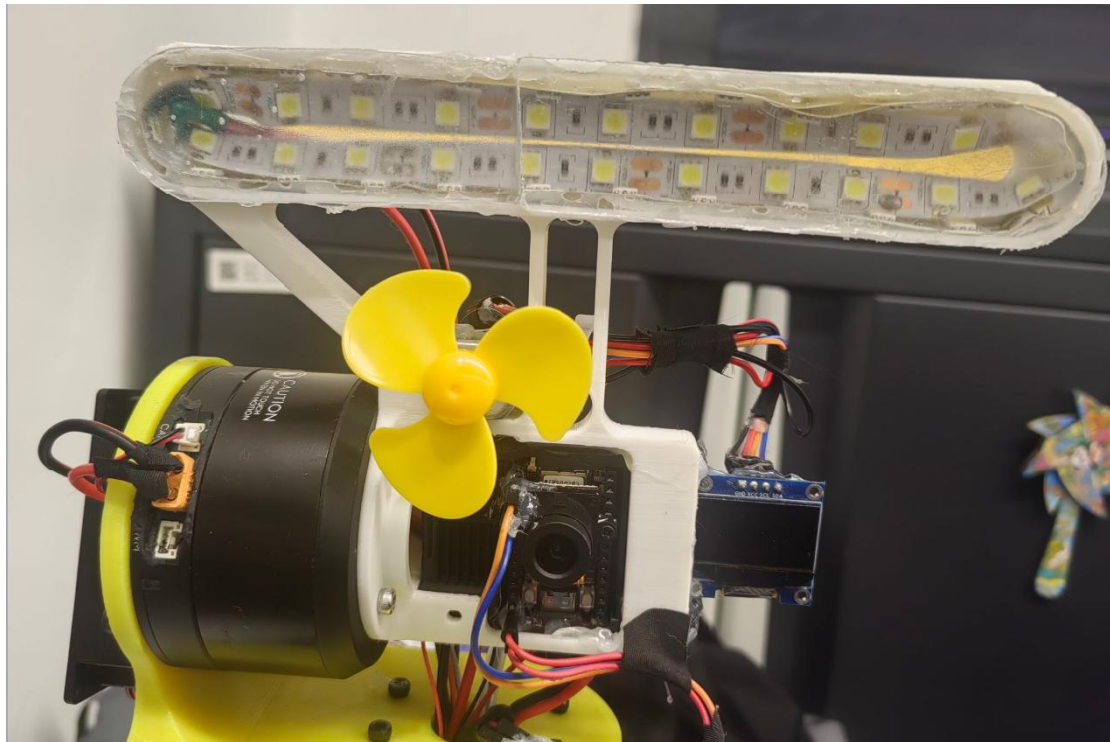


图 5.3.1 亚克力板+多点光源设计

### 5.3.1 扩散透镜

采用亚克力均光板对多点光源进行二次混光，降低眩光并提升照度均匀性，从而形成更柔和的面光源效果。

### 5.3.2 反光材料

灯头内部可使用高反射率白色 PLA 材料作为腔体反射面，减少侧向光损失并改善边缘均匀性；同时对发热区域进行隔热与散热设计，保证长期工作稳定。

## 5.4 无影效果验证

在焊接电路板与书本阅读场景中，通过“多点柔光+均光板+云台角度调节”，手部/工具遮挡产生的阴影明显减弱；同时主观眩光降低，长时间使用更舒适。

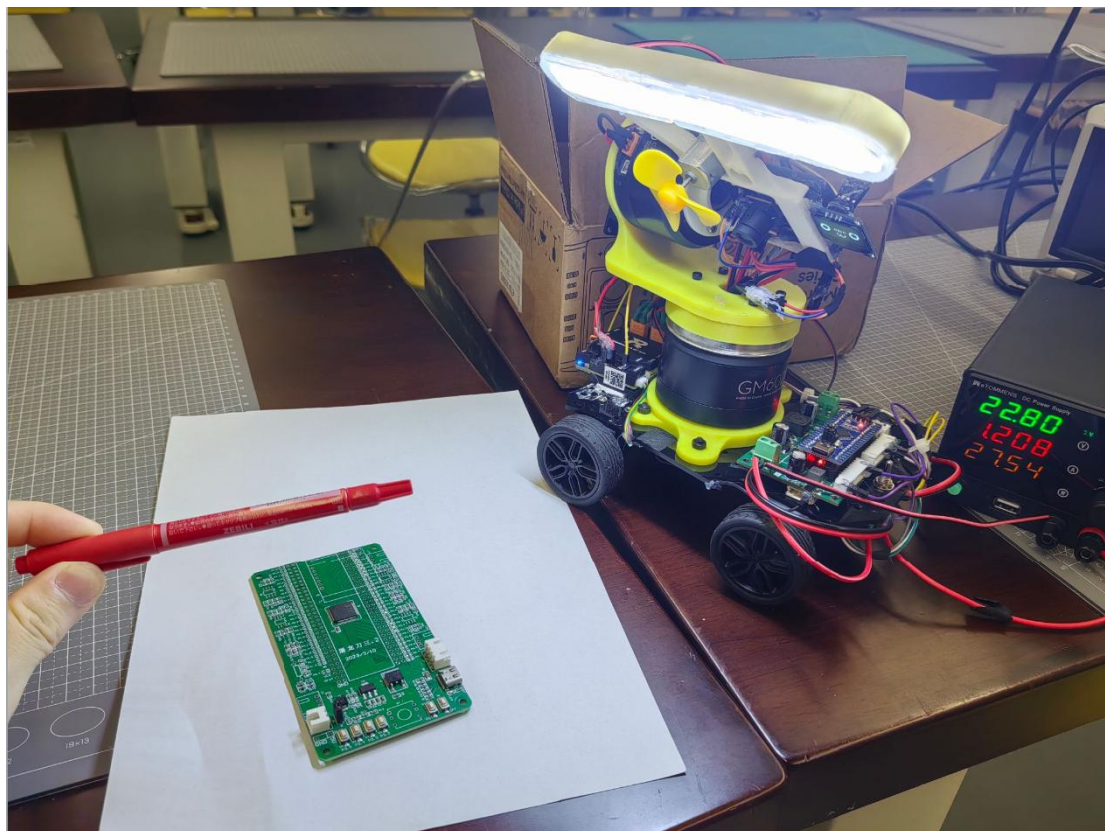


图 5.4.1 无影灯效果

## 六、系统调试与性能验证

### 6.1 硬件调试

(1) BUCK 板调试：验证 MOSFET 驱动与同步整流工作正常，测量输出纹波与效率；校准 ADC 采样与电流换算。

(2) 云台与 CAN：完成 GM6020 上电校准、零位设定与 CAN 通信测试；验证姿态稳定与跟随响应。

(3) 外设联调：OLED 显示、风扇驱动、供电与线束可靠性检查。

## 6.2 软件调试

(1) 语音模块：离线配置唤醒词与指令集（开灯/关灯/亮度档位/开风扇/模式切换），串口解析与去抖。

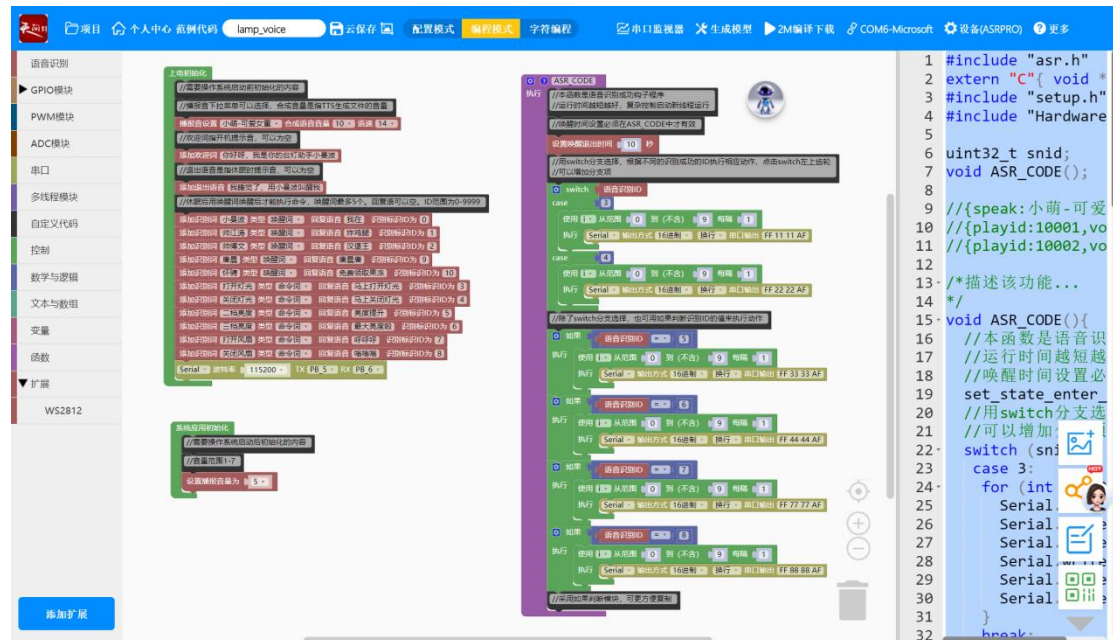


图 6.2.1 语音编程逻辑

(2) 自学习跟随：基于 NanoTrack 单目标跟踪，支持丢失找回 (lost\_find\_interval) 并输出目标偏差用于云台控制。

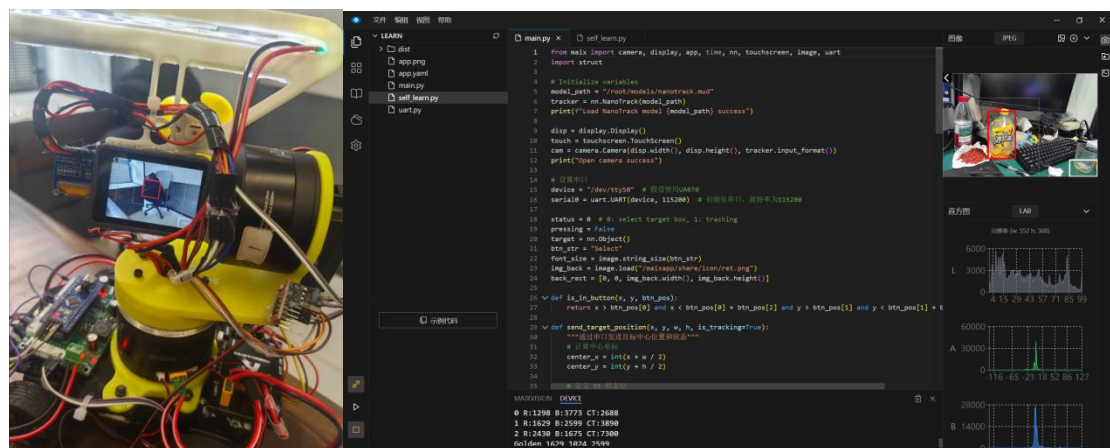


图 6.2.2 自学习（脱机）

图 6.2.3 自学习跟随源码

(3) 手势识别：HandLandmarks 提取 21 关键点特征, LinearSVC 分类识别“five/OK”等手势并触发跟随/锁定。

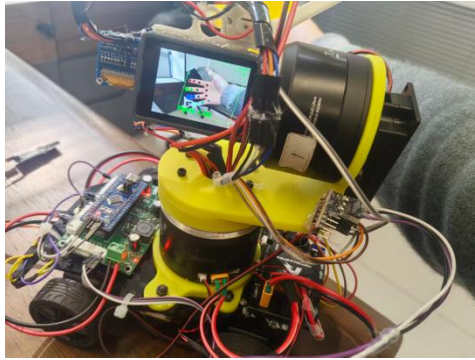


图 6.2.4 手势识别（脱机）

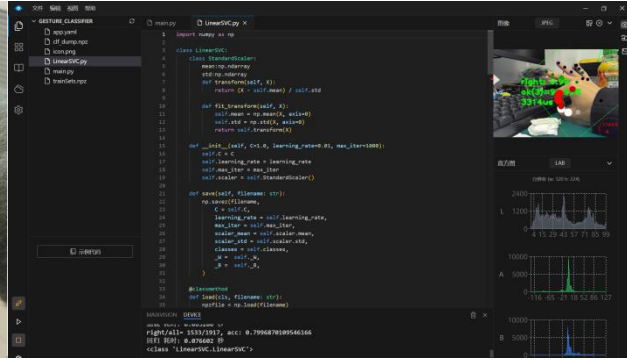


图 6.2.5 手势识别源码

(4) 情绪识别: Yolov8-face 检测人脸后裁剪标准人脸图, 分类得到 angry/disgust/fear/happy/sad/surprise/neutral 等情绪, 并驱动桌宠反馈状态机。

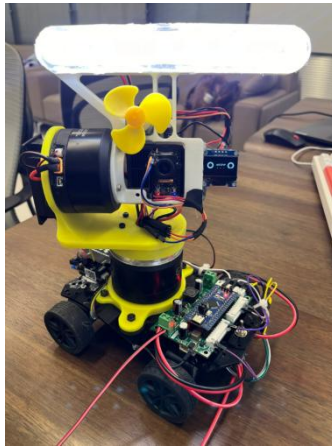


图 6.2.6 情绪识别与互动

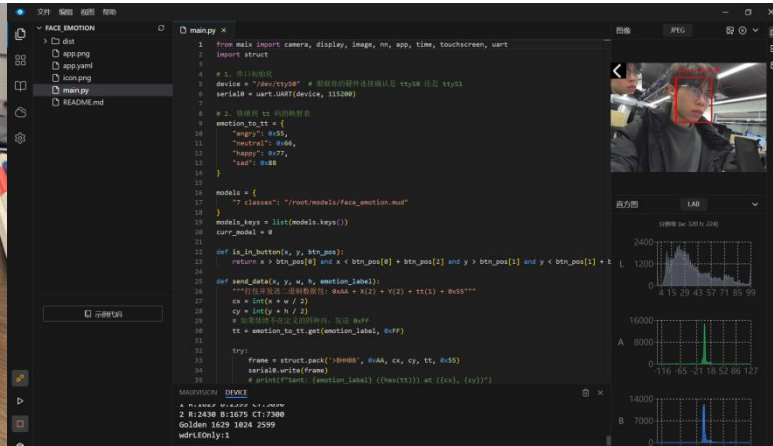


图 6.2.7 人脸情绪识别源码

## 6.3 性能验证

(1) 亮度稳定性: 三档亮度下无明显闪烁; 输入电压波动与负载变化时, 恒流闭环可保持亮度基本稳定。

(2) 跟随与交互: 目标跟踪实现“框选即跟随”; 手势可实现跟随/锁定切换; 语音指令完成常用控制。

(3) 情绪反馈: 对开心/难过/愤怒/自然等情绪给出差异化灯光与动作反馈, OLED 表情同步切换。

(4) 焊接辅助: 开启风扇后可改善焊接烟雾在桌面区域的聚集。

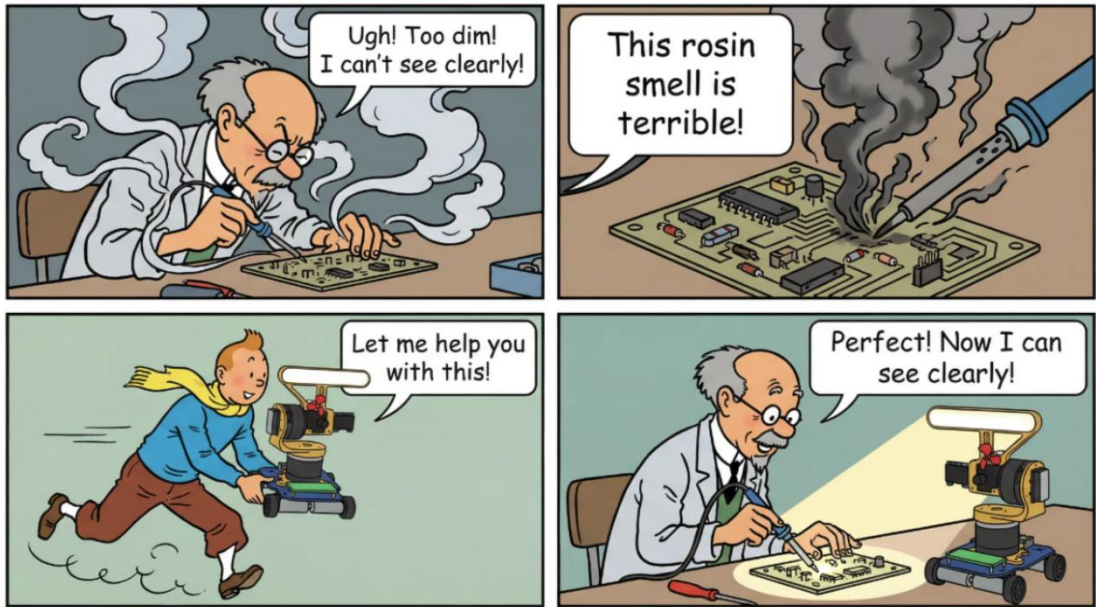


图 6.3.1 故事板模拟

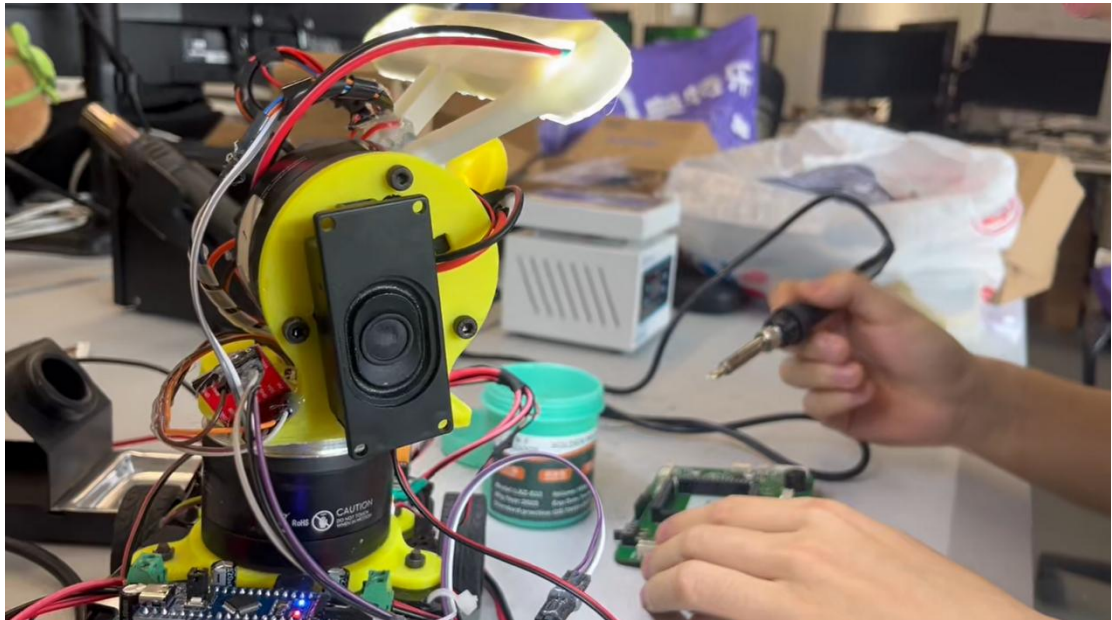


图 6.3.2 真实焊接场景验证

## 七、成本预算与物料清单

主要物料:

类别	名称	数量	价格
视觉	MaixCAM	×1	200
语音	ASRPRO2.0 离线语音模块	×1	36
显示	0.96 寸 OLED	×1	5
照明	多 LED 点光源+亚克力均光板	×1	0
电源	同步 BUCK 驱动板	×1	0
风扇	130 直流有刷电机	×1	10
总价	-	-	251