

2017 年全国大学生电子设计竞赛

滚球控制系统（B 题）



电子科技大学

章程

韦仕才

雷子昂

2017 年 8 月 11 日

摘 要

本滚球控制系统采用 STM32F103RBT6 为主控芯片，通过摄像头定位小球坐标，通过舵机控制平板两个自由度的旋转；采用 oled 和按键作为人机交互界面，显示任务编号和状态，当前路径和运行时间等信息；采用 freeRTOS 调度多任务并行处理。在控制算法上，对平板两个自由度分别采用了不完全微分变速积分 PID；；在目标路径追踪环节，辅以前馈控制器和微分先行，实现了对小球目标坐标和轨迹的快速、平滑追踪。本文实现的平板小球能准确定位到目标区域并在远小于规定时间内完成题目规定的要求。

关键词： 平板小球，图像处理，PID

Abstract

The ball control system uses STM32F103RBT6 as the master chip, through the camera positioning small ball coordinates, through the steering gear control plate two degrees of freedom of rotation; use oled and keys as human-computer interaction interface, display the task number and status, the current path and Run time and other information; using freeRTOS scheduling multi-task parallel processing. In the control algorithm, the two degrees of freedom of the flat are respectively used in the incomplete differential variable PID; in the target path tracking link, supplemented by the feedforward controller and the differential first, the realization of the ball target coordinates and trajectory fast and smooth track. The flat pellets realized in this paper can be accurately positioned to the target area and complete the requirements of the subject matter within a specified time.

Keyword: Flat ball, image processing, PID

目 录

1.	系统方案.....	6
1.1.	主控芯片选择.....	6
1.2.	机械结构论证与选择.....	6
1.3.	动力源的选择.....	6
2.	系统理论分析与计算.....	7
2.1.	动力学建模.....	7
2.2.	小球检测分析.....	8
2.3.	控制算法的分析.....	8
2.3.1.	PID 算法分析.....	8
2.3.2.	小球路径算法分析.....	9
3.	电路与程序设计.....	10
3.1.	电路的设计.....	10
3.1.1.	系统总体框图.....	10
3.1.2.	STM32F1 最小系统模块.....	10
3.1.3.	电源电路结构框图.....	10
3.1.4.	按键模块.....	10
3.2.	程序设计.....	11
3.2.1.	程序功能描述与设计思路.....	11
4.	测试方案与测试结果.....	11
4.1.	测试条件与仪器.....	11
4.2.	测试项目与方法.....	11

4.3.	测试结果	11
4.4.	测试分析与结论	12
5.	参考文献.....	12
6.	附录 1：电路原理图	13

1. 系统方案

本系统主要由电路模块、系统机械结构组成，下面分别论证这几个模块的选择。

1.1. 主控芯片选择

方案一：采用传统的 AT89C51。

方案二：采用 ST 公司提供的 STM32F103RBT6。

综合以上几种方案，传统的 51 单片机为 8 位机，价格便宜，控制简单，但是运算速度慢，片内资源少，难以实现快速精准的反应控制。而 STM32 作为一款流行的 32 位处理器，资源丰富，运算速度快，大容量 flash，较为适合需要快速反应的板球系统。通过比较，我们选择 STM32F103RBT6 为主控芯片。

1.2. 机械结构论证与选择

方案一：简化的浑天仪结构。

方案二：万向节+球头连杆结构。

综合以上几种方案，简化的浑天仪结构有两个维度，将平板放置在方形框之中，利用舵机直接驱动使边框旋转，控制平板在两个维度上翻转，旋转的角度范围较大，但是要求力矩较大，而且结构复杂。外向节+球头连杆结构是利用万向节固定平板，使之有两个方向自由度，利用舵机通过球头连杆驱动，这样结构简单，且球头连杆的传动作用，对力矩的要求减弱。考虑到制作的难易，我们最终选择了方案二

1.3. 动力源的选择

方案一：采用数字舵机。

方案二：步进电机。

综合以上几种方案，步进电机控制简单，电机旋转的速度正比于脉冲数，可以直接开环控制，但是其动态响应不好，随着转速提高容易丢步，无法到达很高转速。数字舵机虽然响应速度较慢，但外围电路简单，且内部自带控制器，闭环控制，更具稳定性。综合以上二种方案，我们选择了动态响应好的数字舵机

综上所述，本系统总体系统框图如 Figure 1-1 所示。

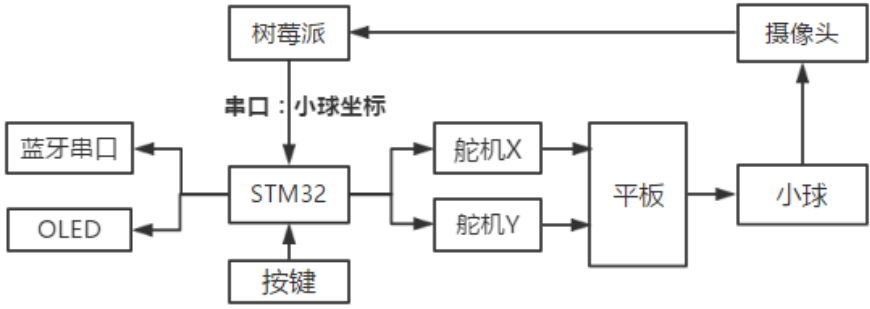


Figure 1-1: 系统整体框图

本系统整体模型如 Figure 1-2 所示



Figure 1-2: 系统整体模型

2. 系统理论分析与计算

2.1. 动力学建模

由于 XY 方向舵机转动平面可以认为相互垂直，可以认为 XY 方向的旋转控制具有较低耦合度。将小球视为质点，忽略小球与平板之间的阻力，可将任意方向抽离出来可以形成如图 Figure 2-1 模型。

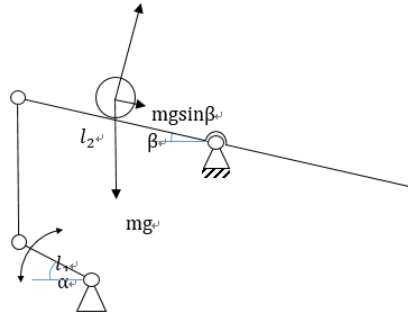


Figure 2-1: 运动建模

由以上模型可以推导出以下微分方程：

$$mg \sin \beta = m \frac{d^2 y}{dt^2} \quad (1)$$

其中 y 是小球的坐标， β 是倾斜角度。

同样，平板旋转角度 β 和舵机摇臂旋转角度 α 之间的关系可以简化为：

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{l_1}{l_2} \quad (2)$$

联立方程（1）和（2）进行拉普拉斯变换可以得到系统的传递函数为：

$$H(s) = gl_1/l_2 \frac{1}{s^2} \quad (3)$$

根据测量，实际 $l_2 = 320\text{mm}$ ， $l_1 = 20\text{mm}$ ，取 $g = 9.8\text{m/s}^2$ 。

2.2. 小球检测分析

本平板小球的检测方案设计依照题目要求，根据现实环境进行设计。本系统采用树莓派在 Linux 下基于计算机视觉库 OpenCV 进行图像处理。由于机械设计已将摄像头与平板相对固定，因此可以简单经过畸变校正后将平板区域截取出来。由于平板和金属小球亮度反差较大，可以直接对截取后的图像进行二值化处理，并计算处理后图像的重心，作为小球坐标。此方法可以做到亚像素的精度。

2.3. 控制算法的分析

2.3.1. PID 算法分析

为了实现题目目标区域停留时间的要求，引入 I 控制，根据实际情况，舵机的惰性较大，响应不够及时，因此同时引入 D 控制以减少超调，综上使用 PID 反

馈控制。同时为了减少超调，采用变速积分 PID 控制，将变速积分的线性区域设置在 10~50mm 之间。为了减小由 D 控制放大的摄像头获取小球坐标的一些噪声，采用不完全微分 PID，单独对微分项进行低通滤波，如图 Figure 2-2 提高对噪声的抑制能力。为了在目标坐标设定和轨迹跟踪状态下减少控制环节的滞后，在 PID 的基础上添加了一环前馈控制如图 Figure 2-3。综上所述，在静态定点状态采用不完全微分微分先行前馈控制 PID 控制。以 X 方向为例，最终的整体控制框图如图 Figure 2-4 示。

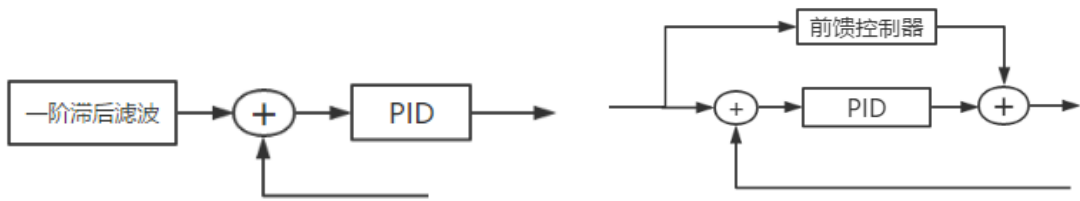


Figure 2-2: 不完全微分 PID 模型

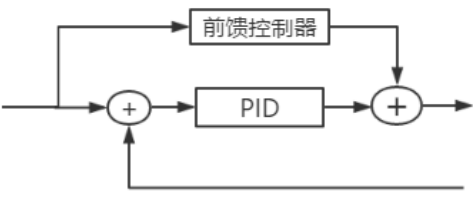


Figure 2-3: 前馈控制器模型

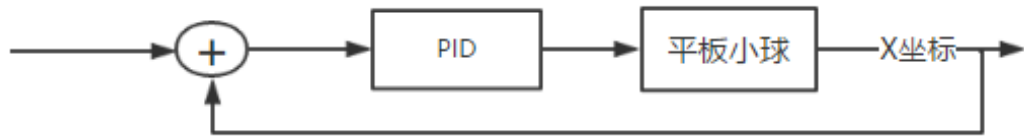


Figure 2-4: 整体控制算法框图

2.3.2. 小球路径算法分析

为了能够实现对小球轨迹的要求，避免经过未指定区域，将目标区域进行了重新规划，新排序 0 到 8 对应原来的 1 到 9，此外新增加了在指定区域外的四处安全区域 9 到 12。如图 Figure 2-5 。当小球的终点在出发点周围时直接做直线运动，当终点和出发点间隔有未指定区域时就从新增加的四处安全区域运动到目标位置。

为了实现题目对小球轨迹的要求，从一点运动到另一点。将二维平面运动分解成一维的直线运动处理。根据题目的轨迹要求要求和新规划的平板位置，再将一维运动拆分成小段直线运动映射到安全区域内点到点之间的运动，设置运动的首尾位置和时间，计算出运动速度后再叠加得到最终的运动轨迹。

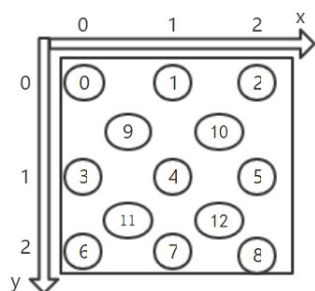


Figure 2-5: 新规划的平板示意图

3. 电路与程序设计

3.1. 电路的设计

3.1.1. 系统总体框图

系统总体框图如图 Figure 3-1 所示。系统的整体电路图见附图 1

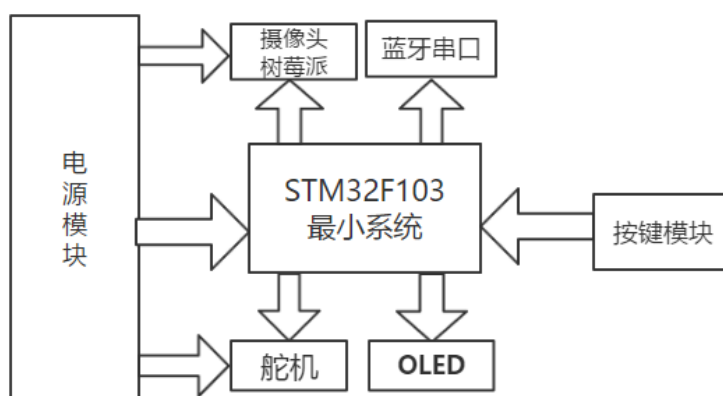


Figure 3-1: 电路系统整体结构

3.1.2. STM32F1 最小系统模块

STM32F103 芯片是电路主控芯片是直接采用的最小系统板，引出了双排排针的引脚，外接了 JTAG 接口用于程序下载。因为电路简单，所以不再附框图，具体电路看附图 2。

3.1.3. 电源电路结构框图

电源电路由 12V 电压输入，5V 稳压模块，3.3V 稳压模块组成。5V 电压输出供给 STM32 模块，I2C 设备，Uart 接口和舵机。3.3V 输出个给 I2C 设备，按键模块。具体电路图见附图 3。

3.1.4. 按键模块

按键模块用于系统交互的输入，由四个按键组成，分别控制小球的左右移动，轨迹运行以及复位。因为电路简单，所以不附框图，具体电路参见附图 4。

3.2. 程序设计

3.2.1. 程序功能描述与设计思路

根据题目要求软件部分主要分为树莓派小球位置检测和单片机平板角度控制部分。树莓派端通过 OpenCV 处理读取到的摄像头图像，获取小球坐标，然后通过串口将坐标发送给单片机。单片机端在串口中断中对获取的小球坐标做出反馈，通过 PID 控制两路舵机转角使平板倾向一定角度使小球运动到指定位置，同时还需要并行处理 OLED 的显示。

单片机采用 STM32F103RBT6/RCT6 最小系统板，搭载 ebox 类 arduino 库，freeRTOS 操作系统。根据设计思路，单片机端需要在 freeRTOS 中建立两个任务，负责 OLED 的刷新。在串口接收中断中对按键进行相应，切换小球控制状态，利用坐标根据不同状态进行 PID 反馈。由此得出的单片机端流程图见附图 5。.

4. 测试方案与测试结果

4.1. 测试条件与仪器

测试条件：检查多次，仿真电路和硬件电路必须与系统原理图完全相同，并且检查无误，硬件电路保证无虚焊。

测试仪器：数字示波器，数字万用表。

4.2. 测试项目与方法

- (1) 分别测试题目基本部分 1 到 4 和发挥部分 1 和 3 共七个要求的完成情况和完成时间，有停留要求的按最小时间记。重复 3 次，平均值记录在 Table 4 -1。
- (2) 单独测量发挥要求 2，任意指定四个目标点，测试完成时间。测量 6 次，记录在 Table 4 -2。

4.3. 测试结果

Table 4-1：题目基本要求好发挥要求 1 和 3 测量						单位：秒
测试项目	基础要求 1	基础要求 2	基础要求 3	基础要求 4	发挥要求 1	发挥要求 3

完成情况	5	5	11	10	13	25
完成情况	5	6	12	9	12	26
完成情况	5	5	12	11	12	26
平均统计	5	5.34	11.67	10	12.34	25.67

Table 4-2: 发挥要求 2 测量记录

单位: 秒

路径	1234	1598	7241	2514	8769	7914
完成情况	17	16	14	15	17	15

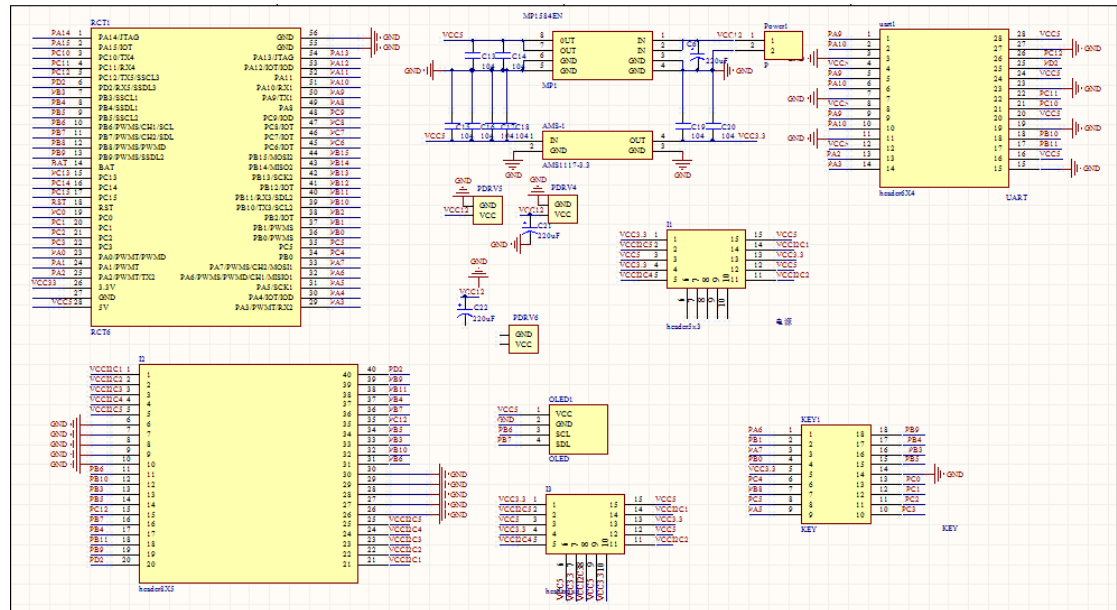
4.4. 测试分析与结论

经过多方面的数据测试分析,系统总体上达到较好性能。平板小球能在定点,寻迹情况实现精准定位,完成时间远远低于题目要求时间,并达到了题目的精度要求。动态响应虽有一定的超调,但是最终结果能很快的稳定在目标位置。平板小球运行性能较好,制作成本低,性价比高。目前平板小球的误差主要来源于舵机驱动的死区和平板本身过大的摩擦力。舵机的死区大概了 $2\mu s$,加上传动装置,平板角度误差在 1 度左右,过大的摩擦力使得小球接近目标区域时角度反馈不足以抵消静摩擦带来较大的稳态误差。若是采用更光滑的平板或和增大小球的密度或者采用更高精度的舵机都可以用来提升定位的精度。

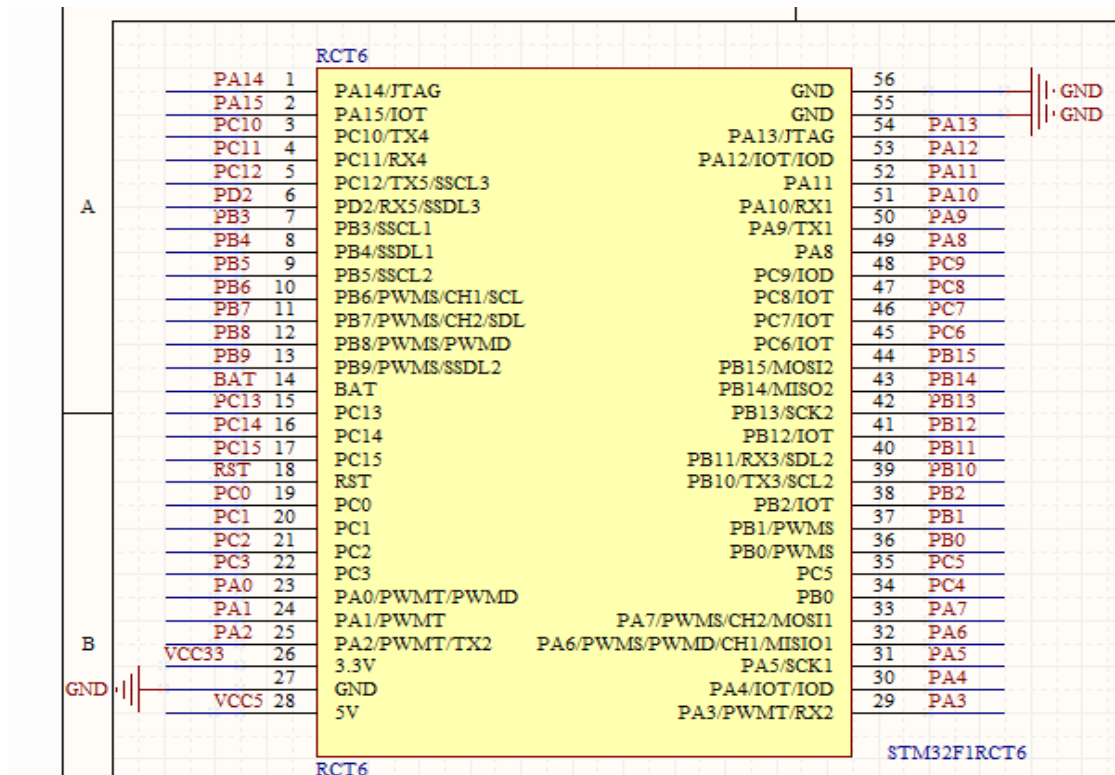
5. 参考文献

- [1] 袁茵. 动态平衡中的数学思想. 湖南中学物理[J].2012 [10] 72--73
- [2] 钟建冬. 小球在平台上的自动定位系统 [D]. 上海交通大学. 2004.06.01
- [3] 孙朝晖 吴浩伟 方斌 耿攀. 采用 PID 和重复控制的逆变器波形控制策略 航电技术[J] 2010.2 [30] 14--17
- [4] 基于 PID 控制和重复控制的智能 UPS 研究 电测与仪表[J] 2015 [5]
- [5] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真 [M] 电子工业出版社 2011.3.31

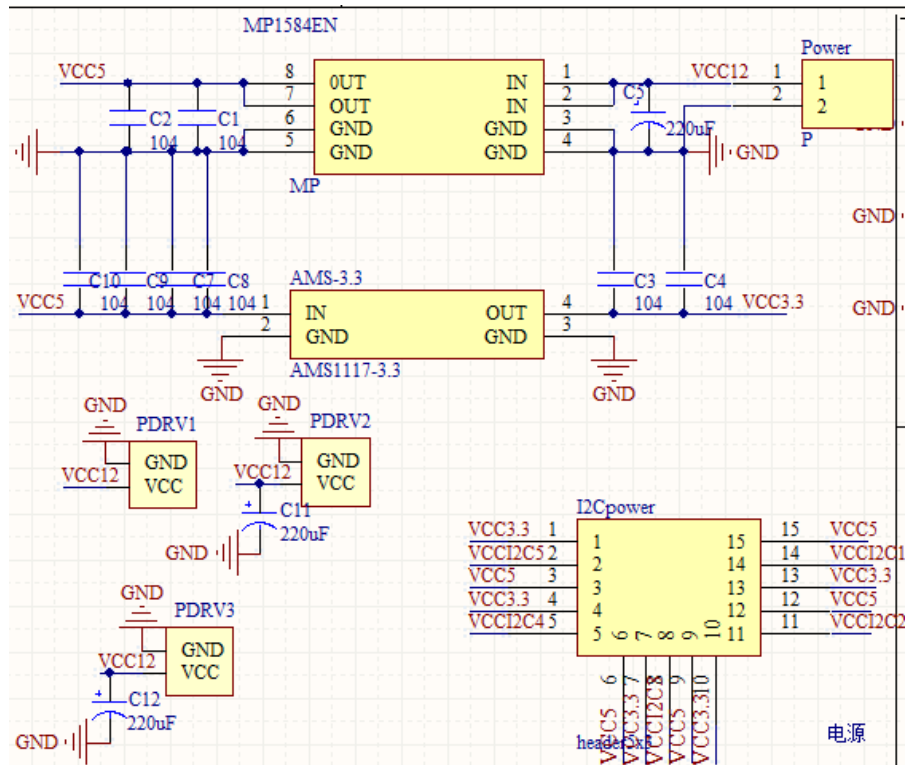
6. 附录 1：电路原理图



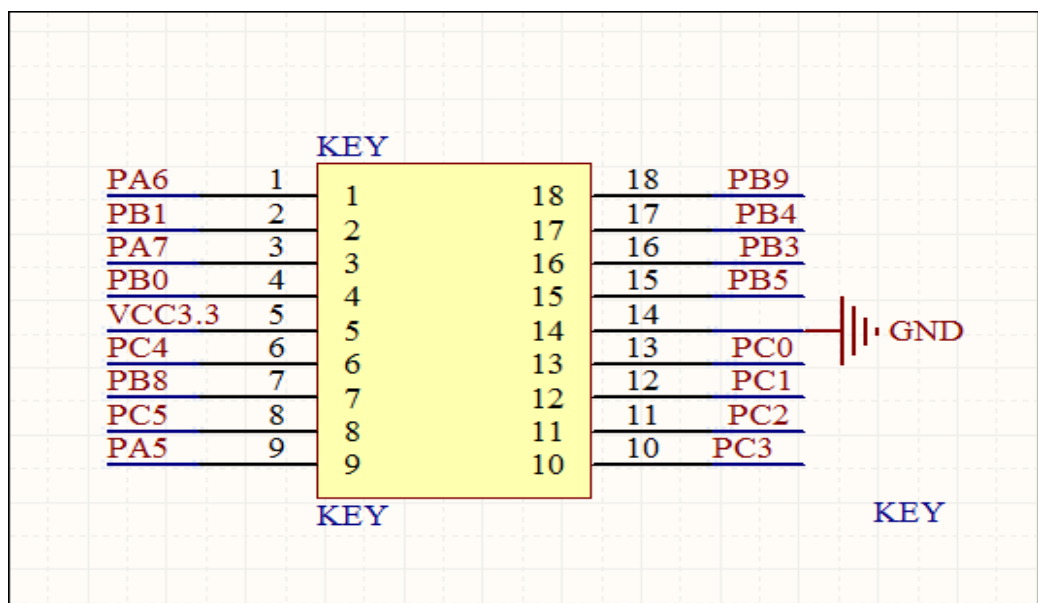
附图 1：系统电路



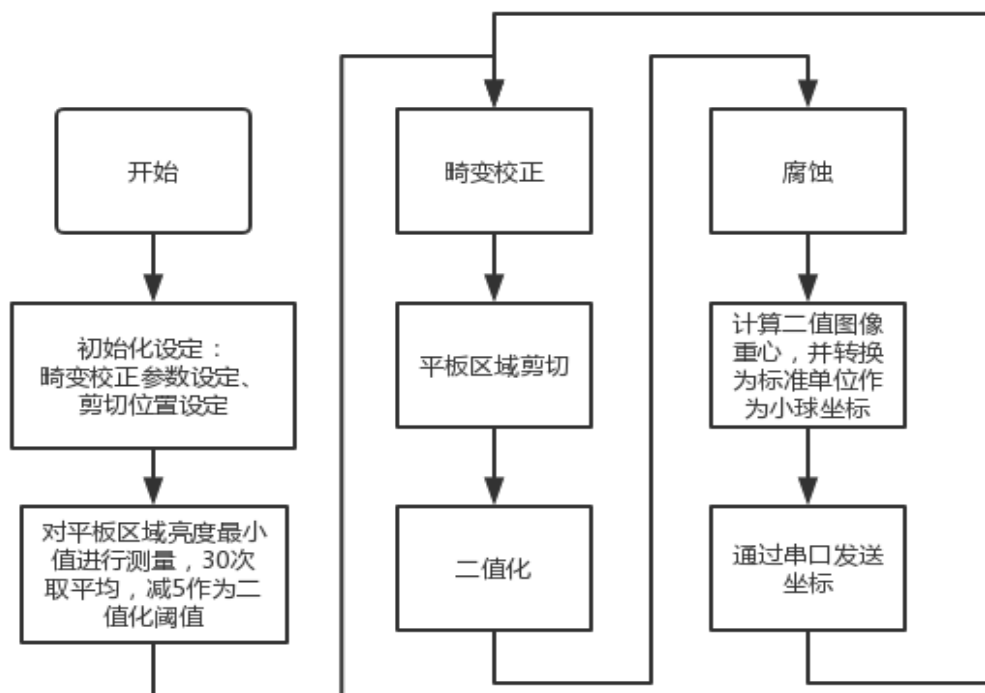
附图 2：STM32F1 最小系统模块



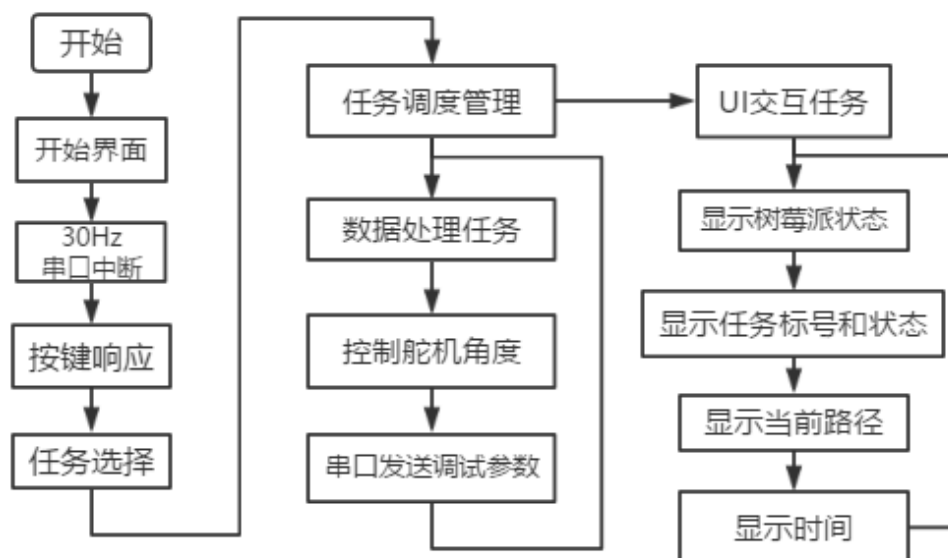
附图 3：电源电路



附图 4：按键模块



附图 5：树莓派端程序流程图



附图 6：单片机端流程图