

滚球控制系统

——自动控制系统设计与实践

成员：邓修齐，石文博，李莹莹，刘杨桂嶠

一． 背景

在边长为 30cm 光滑的正方形平板上均匀分布着 9 个外径 2.5cm 的圆形区域，其编号分别为 1~9。设计一控制系统，通过控制平板的倾斜，使直径不大于 2.5cm 的小球能够按照指定的要求在平板上进行移动与定位，并从动作开始计时并显示，单位为秒。

滚球控制系统通过摄像头获得滚球装置中小球和平板的图像，采用三值化处理图像，通过坐标变换转换为小球在平板上的位置信息，将位置信息传送给 STM32F103RC 系统控制器，在平板的两个相互正交方向上分别进行模糊 PID 控制算法，控制置于平板四角的步进丝杆电机带动平板升降，从而间接控制小球直线、绕环等运动。采用按键选择和 LCD 液晶显示屏，选择和显示工作模式和参数。

二． 目标

在实现原题要求的基础上，我们提出以下更高要求：

1. 精度要求：小球静止时距指定位置误差不超过 3cm
2. 任意定位：能对平板上任意位置进行定位
3. 响应时间：小球移动到平板任意位置不超过 15s
4. 鲁棒性：当小球定点后，如果受到外界干扰，系统拥有自动恢复原状态的能力
5. 结构要求：根据平板运动轨迹设计支撑结构，使得平板保持线接触或者点接触，保证系统精确度
6. 中断挂起：当小球正在朝一个目标点运动时，如果收到新的目标请求，能将前进程挂起执行新进程，到达新目标点后再继续执行原线程。
7. 色彩提取（展望目标）：能够对平板上除了小球外的颜色进行提取，实现颜色跟踪定位

三． 分析

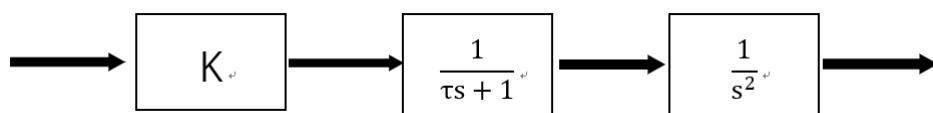
1. 系统建模与时间常数

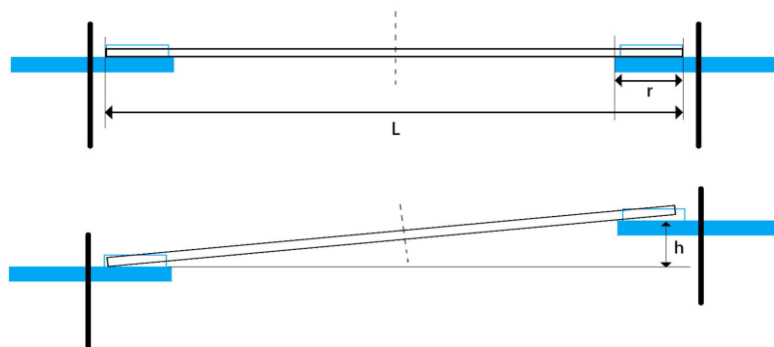
平板-小球系统是具有两个输入（小球的横纵坐标）和四个输出的二自由度非线性动态系统，其控制目的是一个自由滚动的小球实现定点控制或运动轨迹控制。为了方便分析，我们做出以下合理假设：1) 忽略所有摩擦力；2) 任何情况下球、板都接触；3) 球在板上没有滑动。

对于步进电机，输出相同的步进数，平板的升降高度一致。对小球运动做 x、y 方向上的分解，该系统可近似认为线性运动系统。

单个方向上小球加速度： $a=g\sin\theta$

当平板倾角 θ 较小时， $\sin\theta\approx\tan\theta$ 可近似认为小球加速度与电机输出的步进脉冲数成正比。可见，系统输出量直接控制小球的加速度，系统输入的是小球坐标，输入输出是具有二阶微分关系，再考虑摩擦力的影响，这个系统可简化成一个一阶惯性+二阶纯滞后环节。





设板长为 L ，抬升高度为 h ，板的倾斜角度为 θ 。设小球起始点在平板最右端，目标点在平板最左端。以目标点为坐标原点建立坐标系，设小球当前距离目标点的距离为 x 。

则可以求得平板抬升高度 h 的公式：

$$h = \frac{N_0 \theta_0 S}{f * 360^\circ} x$$

N_0 ：单位距离 x 引起控制器输出的脉冲数。

θ_0 ：电机步进角度。

S ：电机丝杆螺纹的导程。

f ：步进电机驱动的分频数。

由于以上四个参数都是常数，我们令 $K = \frac{N_0 \theta_0 S}{f * 360^\circ}$

得到：

$$h = Kx$$

可见，平板抬升高度与小球距离位移 x 成正比。

又由运动学公式推出，小球运行的加速度为：

$$a = -g * \sin\theta$$

由几何关系推出

$$\sin\theta = \frac{h}{L}$$

联立上面三式得到：

$$a = -\frac{Kg}{L}x$$

由位移和加速度的关系可得微分方程：

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{Kg}{L}x$$

解微分方程：

$$x = -e^{-Kh} \quad tx = -e^{-\sqrt{\frac{Kg}{L}}t}$$

因此此系统的时间常数为：

$$\tau = \sqrt{\frac{L}{Kg}}$$

实际中， $L=0.3\text{m}$ ， $K=0.1$ ， $g=10\text{m/s}^2$ ，计算得到

$$\tau = 0.55\text{s}$$

2. 状态空间与可控、可观性分析

选取观测方位左上角为坐标原点 (0,0)，建立直角坐标系如右图所示。

设 x 方向的位移为 s_x ，y 方向的位移为 s_y ；设目标点坐标为 (x_t, y_t) ，设摩擦力为 f ，小球质量为 m 。结合上文相关公式，推导得到小球在 x 和 y 方向的加速度为：

$$\dot{s}_x = \frac{gK_x}{L}(s_x - x_t) - \frac{f_x}{m}$$

$$\dot{s}_y = \frac{gK_y}{L}(s_y - y_t) - \frac{f_y}{m}$$

选取状态空间变量： $x = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T$ ：

$$x_1 = s_x, x_2 = \dot{s}_x, x_3 = s_y, x_4 = \dot{s}_y$$

为方便分析，设 $(x_t, y_t) = (0, 0)$ ：

得到状态空间方程：

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{gK_x}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{gK_y}{L} & 0 \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{f_x}{m} \\ 0 \\ -\frac{f_y}{m} \end{pmatrix} u$$

$$y = (1 \quad 0 \quad 1 \quad 0)x$$

系统的可控性矩阵为：

$$M_{ctrl} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{f_x}{m} & 0 & -\frac{gK_x f_x}{mL} \\ -\frac{f_x}{m} & 0 & -\frac{gK_x f_x}{mL} & 0 \\ 0 & -\frac{f_y}{m} & 0 & -\frac{gK_y f_y}{mL} \\ -\frac{f_y}{m} & 0 & -\frac{gK_y f_y}{mL} & 0 \end{pmatrix}$$

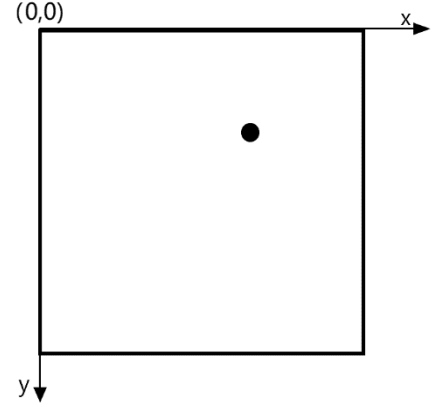
$$r(M_{ctrl}) = 4$$

系统的可观性矩阵为：

$$M_{obse} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ \frac{gK_x}{L} & 0 & \frac{gK_y}{L} & 0 \\ 0 & \frac{gK_x}{L} & 0 & \frac{gK_y}{L} \end{pmatrix}$$

$$r(M_{obse}) = 4$$

由于可控性矩阵和可观性均满秩，所以该系统完全可控且完全可观。



四． 方案

1. 硬件

1.1 平板选型

平板-小球控制系统的平板有木板，泡沫板，亚克力板等可供选择。

其中木板、泡沫板质量轻，表面摩擦力小，但容易因为吸水、机械外力等外界因素造成不可逆变形，影响定位精度；同时泡沫板面有颗粒状纹路，木板不是白色。

因此我们选择磨砂亚克力板，磨砂处理有效避免了平面光的反射，硬度大不易因外力造成不可逆形变，且颜色为白色，方便控制。

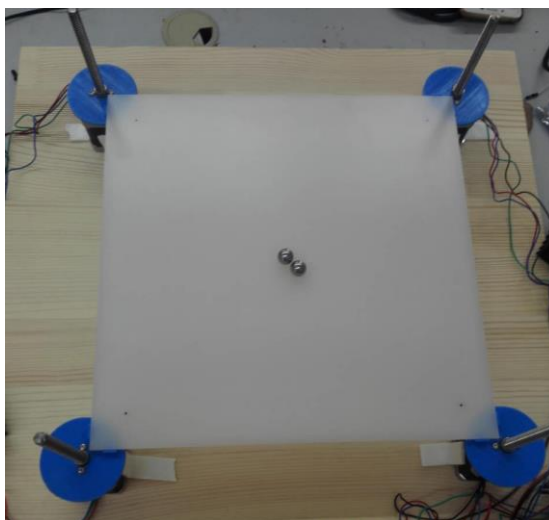
1.2 电机选型

方案一：舵机驱动、机械臂与万向结支撑类，配合木板泡沫板。舵机合机械臂组合运动速度快、幅度大，本题平板规格较大较重，舵机臂支撑困难，且由于舵机摆动幅度大，难以做到精确定位。

方案二：步进电机驱动、自制结构支撑类。步进电机具有推力大，可精确控制行程的优点。结合自制结构支撑可以减少平板自重弯曲对于小球定位精度的影响。

综合以上两种方案，从控制机构的稳定性、准确性、快速性等方面考虑，采用步进电机。进一步分析本系统的结构特性，选择 42-丝杆步进电机，并用自制支撑结构将电机的轴向转动转化为竖直方向上的垂直运动。

为了让支撑力矩最小，需要保力臂最长，因此采用平板四角支撑的硬件结构，效果如图所示：



1.3 电源设计

我们自己设计了供电电源，可以同时输出 24V/5V 两种电压。

电源模块采用 NES-100-24 模块将 220V 交流电压整流为 24V 直流电压，24V 用于直接给电机驱动器供电；24V 电压经过 MP1584 模块降压为 5V 直流电压，给单片机供电。

1.4 电机驱动器

步进电机驱动选择 **TB6600**，该步进电机驱动器最高支持 32 细分。综合考虑本系统的要求，考虑稳定性与准确性等性能要求，电机驱动器设置为 **8 细分**，电流限幅 **1.5A**。

通过设置定时器中断，产生 5KHz 的脉冲，用于驱动步进电机转动。同时电机的片选使能、方向选择等控制线由单片机设置 IO 推挽输出产生相应高低电平来实现。

1.5 其他器件

控制模块选用 STM32 单片机最小系统版，芯片为 STM32F103ZET6。

摄像头选用 OV7670 模块。

显示屏选用 ILI9325 屏幕。

2. 支撑结构

2.1 误差分析：

选取平板的一个截面做分析。

设：平板边长为 L ；

平板与圆盘相交部分长度为 r 。（即：挡板根部到圆盘边缘的距离为 r ）

系统切面简图为：

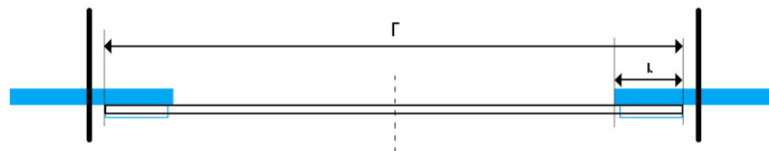


图 1

从图 1 可得，平板平衡时，平板两侧的挡板，恰好使平板固定不动。

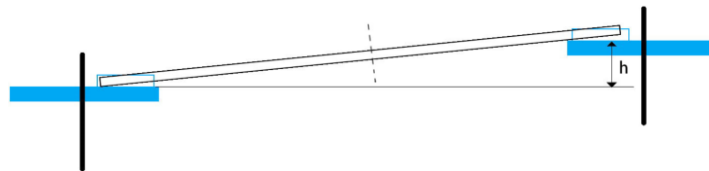


图 2

图 2 是系统的非平衡状态，一边上升，另一边下降。

设：右边圆盘相对于左端上升的高度为 h 。

由于系统采用差动控制，理想状态下平板的中心点（质心）将在空间中保持静止不动。

但实际中，当右边圆盘上升时，由于三角形的特性可知，平板将出现滑动，平板左端抵住挡板，右侧平板则脱离挡板，平板中心向左偏移，导致置于平板上方的摄像头采集图像出现误差，对系统的整体控制效果带来影响。

此外，平板与挡板的接触点也并非定点：高的一端接触点是圆盘的边缘；低的一端接触点是挡板的根部。当系统上下往复运动时，接触点的不断变换将给系统的测量和控制带来误差。

以上两点是系统的主要误差来源。

2.2 目标

为了减小系统误差，我们要对圆盘结构进行改性：

- 1) 确保当平板倾斜的时候，平板中心点保持静止。
- 2) 使平板与圆盘保持点接触。

2.3 理论计算

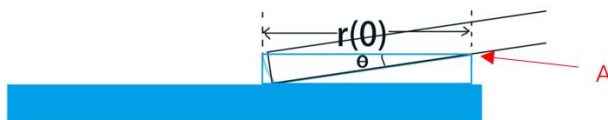


图 3

设：当前平板与水平面夹角为 Θ 。

为了使平板中心点位置在水平面上保持不变，需要在对挡板圆盘进行改进，对挡板给予位置补偿。为了保持点接触，选取圆盘挡板最右端的点 A 为接触点。

设：在不同角度 Θ 下，A 点到挡板根部的间距为 $r(\Theta)$ ；

水平方向上的间距为 $r(0)$ 。

$r(\Theta)$ 即为挡板根部轮廓的极坐标方程。

由于两个圆盘只在竖直方向上上下运动，在水平方向上无相对运动，由对称性分析可知，当且仅当位于两个圆盘接触点以外的平板长度相等时，即高端和低端平板伸入圆盘的距离都为 $r(\Theta)$ 时，平板中心点在空间中保持静止。

用方程的形式描述：

$$[L - 2r(\Theta)]\cos\theta = L - 2r(0)$$

注：方程含义：倾斜时中心点坐标=水平状态时的中心点坐标。

容易解得此方程的解为：

$$\begin{aligned} r(\theta) &= \frac{1}{2} \left[L - \frac{L - 2r(0)}{\cos\theta} \right] \\ r(\theta) &= \frac{1}{\cos\theta} r(0) - \frac{L}{2} \left(\frac{1}{\cos\theta} - 1 \right) \\ r(\theta) &= r(0)\sec\theta - \frac{L}{2}(\sec\theta - 1) \end{aligned}$$

从而得到了挡板根部形状的极坐标方程。将此轨迹以挡板左端轴线旋转一周，就可以得到中心点静止且保持点接触的圆盘结构。

在实际中，步进丝杆电机行程有限，此系统的有效量程约为 4.5cm，即 $h_{max} = 4.5\text{cm}$ ；平板长度 $L = 30\text{cm}$ ，挡板 $r(0) = 2.5\text{cm}$

由几何关系可以推出：

$$\tan\theta = \frac{h}{L - 2r(0)}$$

当 h 取最大值时，有： $\theta_{max} \approx 10^\circ$

因此，有： $\theta \rightarrow 0$

推出： $\cos\theta = \sec\theta = 1$

由此得到 $r(\theta)$ 的近似方程： $r(\theta) = r(0)$

即圆盘挡板的根部轨迹是以接触点 A 为圆心，水平方向上挡板深度 $r(0)$ 为半径的圆。

使用此方程，可以大大简化软件设计的流程。

2.4 三维模型

下面我们将二维空间中的设计图推广的三维空间。

为了保持三维空间里的点接触，我们采用形如下图（俯视）的结构。

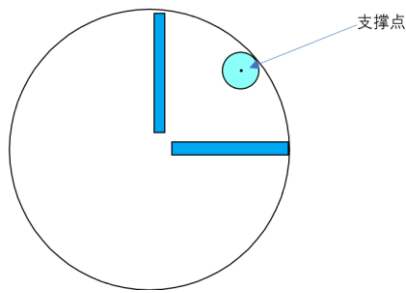


图 4

其中，支撑点位于两块挡板的角平分线上。由于当平板沿着不同的空间角度上下移动时，其截面上的运动半径 r 也会发生变化。如图所示：

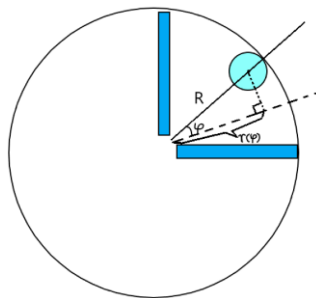


图 5

$$r(\varphi) = R \cos \varphi$$

再带入二维平面的结果，得到：

$$r(\varphi, \theta) = R \cos \varphi$$

注意：角度 φ 和 θ 并不是从同一参考点观察得到的。

三维示意图：

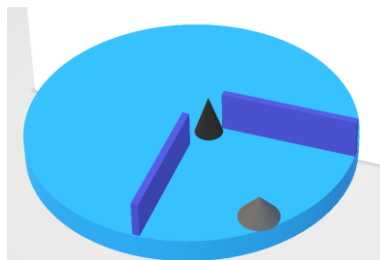


图 5

3. 图像识别

3.1 摄像头参数

型号：OV7670

像素：320*240

IO 电压：2.5Vto3V

输出格式：RGB565

视场角：25°

3.2 原理说明

摄像头通过定时器中断将采集到的一帧图像传输进来，然后将其裁剪到固定的正方形大小，能够恰好覆盖到平板上的所有点，之后进行软件三值化，处理成黑白红图像。其中小球为黑色，平板为白色，激光笔照射点为红色。

若小球在平板上，则计算出小球的位置与速度；若小球不在平板上，则平板通过复位函数自动恢复成水平状态，等待小球的出现。

若激光笔没有照射，则小球的目标点为预设的 9 个目标点；如果有激光笔照射，则目标点为激光笔照射点。

为了小球的速度和加速度计算精确，摄像头帧率需要固定。因此我们通过软件编程将摄像头的工作模式设置为：摄像头硬件外部中断触发请求、内部定时器中断处理。

同时综合考虑摄像头帧率与步进电机脉冲输出的要求，我们将系统划分为两块 STM32 控制板分别控制。连接摄像头的控制板只负责定时读取图像，并通过 SPI 向另外一块 STM32 控制板发送相应信息。

3.3 图像处理

为了方便图像处理，我们对图像的每一个像素进行了三值化处理。即从读取到的彩色图像中提取出黑、白、红三种颜色。由于 OV7670 默认输出为 RGB565，R、G、B 三者权重并不相当，因此我们首先将 G 的色度值除以 2，R、G、B 三者权重就相等了，此时相当于 RGB555 格式。

首先判断当 R（红）色度大于预设**阈值 1** 并且 GB 色度之和都小于预设**阈值 2** 时，判定此像素点为红色；如果不是红色，那么当 RGB 三者之和大于预设**阈值 3** 时，判定为白色；否则，判定为黑色。

通过这个方法，我们就将彩色图像处理成了只含红、白、黑三种颜色的图片。

经过大量实践，我们最终得到一组合适的阈值：

阈值 1 : 30

阈值 2 : 20

阈值 3 : 40

注：转化成 555 格式的 RGB 后，每种色彩的色度范围为：0-31。

3.4 坐标计算

坐标计算包括两个方面：小球的坐标和红光的坐标。其计算原理基本一致。

在读取图像帧的中断服务函数中，有几个用于计算坐标的变量：

- 1) 用于坐标累加求和的变量；
- 2) 用于记录有色像素个数的变量；
- 3) 用于记录上一次和上上一次坐标的变量。

像素求和算法：

每一帧读取前初始化为 0。每读取到一个有颜色的像素，就分别将此像素的横、纵坐标累加到相应的坐标累加求和变量上，同时相应的有色像素变量值+1。当完成一次所有像素点的遍历后，用**坐标累加求和变量的值除以有色像素点的数量**，即可求得平均坐标。

通过当前坐标与上一次的坐标作差，可以得到当前速度；通过当前速度与上一次速度作差，可以求得加速度。坐标、速度和加速度都将用于多闭环串级控制。

误差消除措施：

由于系统控制策略复杂，光照条件不适宜，存在外界干扰等不确定因素，经常会给图像识别带来误差。

举两个典型例子：平板上没有小球，却因为外界干扰读取到了几个黑色像素点，导致系

统误以为有小球存在，因此触发错误的控制动作；由于电路和外界干扰，系统会偶尔出现某一帧图像严重失真，表现为图像出现大量黑色区域，此时系统用平均坐标算法会引起极大误差。

为此我们通过有色像素的点点数判断当前帧是否有效，如果有色像素点点数小于 10 或者大于 150，则抛弃此帧，不进行任何控制操作。

3.5 中断

为了保证控制的精确性，必须要保证坐标、速度、加速度计算的精确性。

由于图像帧率读取的时间间隔将直接影响到速度和加速度的计算结果，因此我们要严格控制摄像头读图帧率。

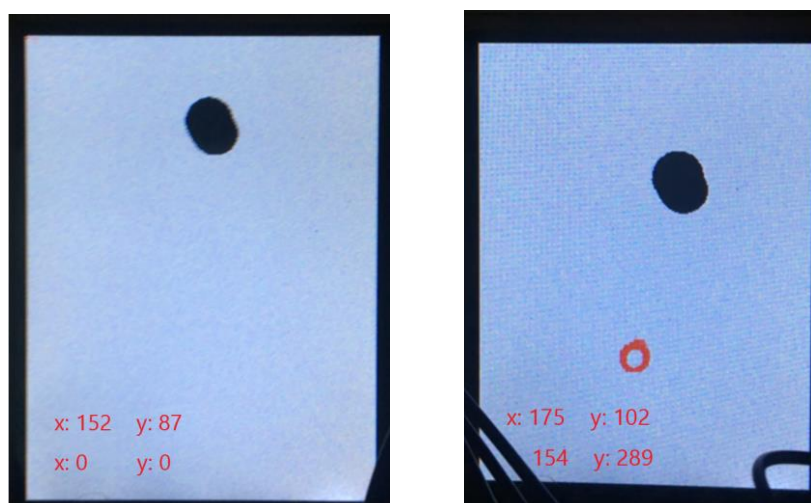
为了方便计算，我们选择帧率为 10Hz，即读图周期为 100ms。

由于系统的所有模块都是中断形式，因此如果中断优先级设置不当，将容易出现被其他更高级别中断打断挂起，产生误差。

因此要将图像读取中断优先级设置得尽可能高：抢占优先级为 0，亚优先级为 3。

3.6 效果图

注：由于照片像素较低，屏幕左下角分别显示的小球坐标与红点坐标在此图里无法辨识。



左图：只有小球的情况 右图：既有小球又有红点的情况

4. SPI 通信

4.1 SPI 简介

为了将摄像头读取到的图像信息发送到另外一块控制板，我们选择 SPI 来传输数据。SPI 是串行外设接口（Serial Peripheral Interface）的缩写，是一种高速的，全双工，同步的通信总线，并且在芯片的管脚上只占用四根线，节约了芯片的管脚。

SPI 以主从方式工作，这种模式通常有一个主设备和一个或多个从设备，需要至少 4 根线，事实上 3 根也可以（单向传输时）。也是所有基于 SPI 的设备共有的，它们是 MOSI（数据输入）、MISO（数据输出）、CLK（时钟）、CS（片选）。

4.2 选择 SPI 的原因

摄像头读取一帧图像需要约 40ms，要求图像帧率为 10 帧/s 的情况下，每个控制周期留给电机驱动模块产生脉冲的时间只剩约 60ms。又由于频率太高的脉冲无法驱动步进电机，

因此大大限制了脉冲发送的数量。图像读取和脉冲发送二者相互挤占时间资源，二者对时间的占用是互斥关系，直接影响控制的响应速度、准确性等指标。

综合考率图像处理与步进电机脉冲输出的要求，我们将系统划分为两块 STM32 控制板分别控制，一块连接摄像头作为**图像处理板**，一块连接电机驱动器作为**电机驱动板**。

主机（图像处理板）负责不间断读取图像，每 0.1s 通过 SPI 发送一组数据。这样保证了图像读取的准确性和实时性。

从机（电机驱动板）通过外部中断方式接收并读取数据，并根据收到的数据实时更新控制策略，产生相应的脉冲输出。

通过这种方案，我们就把图像读取和脉冲发送这两个不可或缺又占用时间的过程分开到两块控制板上运行，将原本互斥的过程变成了并行的过程，大大提升了图像处理精确度与控制质量。

考虑到 SPI 具有全双工操作，接线简单，操作方便，数据传输速率高的优点，因此我们选择 SPI 作为我们通信方式。



4.3 参数设置

图像处理板	电机驱动板
芯片：STM32F103ZE	芯片：STM32F103ZE
SPI 通道：SPI2	SPI 通道：SPI2
SPI 模式：主机模式	SPI 模式：从机模式
CS：PB12	CS：PA8
CLK：PB13	CLK：PB13
MOSI：PB14	MOSI：PB14
MISO：PB15	MISO：PB15
时钟频率（波特率预分频）：256	接收方式：外部中断 8
发送方式：定时器中断	接收周期：0.1s
发送周期：0.1s	

4.4 数据格式

主机发送给从机的数据有 6 个：

数据名	数据类型	含义
loc_x / loc_y	u16	小球的横/纵坐标
red_x / red_y	16 位无符号数	红点的横/纵坐标
empty_flag	U8	是否有小球在板上
red_point	8 位无符号数	是否有红光在板上

由于 loc_x、loc_y、red_x、red_y 为 16 位数据，占用两个字节，在本系统中的可能取值范围是 0-319。而 SPI 发送时每次只发送一个字节，可发送的数据取值范围为 0-255，发送 16 位数据时可能会出现寄存器溢出的情况。

为了正确发送数据,我们设计如下发送数据的方式:将每个 16 位数据拆分为两个数据,一个存储它除以 2 得到的商,另一个存储它除以 2 得到的余数。例如:

待发送数据 $tbuff[0]=loc_x/2$, $tbuff[1]=loc_y\%2$

显然这两个数据都是可以被 SPI 主机正确发送的字节数据。

从机端在收到数据组 $rbuff[]$ 后,只用进行如下操作就可还原 16 位数据:

$loc_x=rbuff[0]*2+rbuff[1]$

这样我们就通过只能发送 8 位数据的 SPI 成功发送 16 位数据。

5. 控制方案

5.1 模糊 PID 控制

在控制中,按偏差的比例 (P)、积分 (I) 和微分 (D) 进行控制的 PID 控制器 (亦称 PID 调节器) 是应用最为广泛的一种自动控制器。它具有原理简单,易于实现,适用面广,控制参数相互独立,参数的选定比较简单等优点;而且在理论上可以证明,对于过程控制的典型对象——“一阶滞后+纯滞后”与“二阶滞后+纯滞后”的控制对象, PID 控制器是一种最优控制。

但当平板角度变大后,倾角和加速度不再具有近似关系。课件 PID 的局限性在于,它过于依赖系统精确的数学模型。对非线性系统, PID 控制计算较麻烦,实时性受到一定的限制。本系统将采用模糊控制与 PID 算法结合继续进行研究来弥补不足。

为了实现对直线电机运动的高精度控制,系统采用全闭环的控制策略,但在系统的速度环控制中,因为负载直接作用在电机而产生的扰动,如果仅采用 PID 控制,则很难满足系统的快速响应需求。由于模糊控制技术具有适用范围广、对时变负载具有一定的鲁棒性的特点,而直线电机伺服控制系统又是一种要求要具有快速响应性并能够在极短时间内实现动态调节的系统。

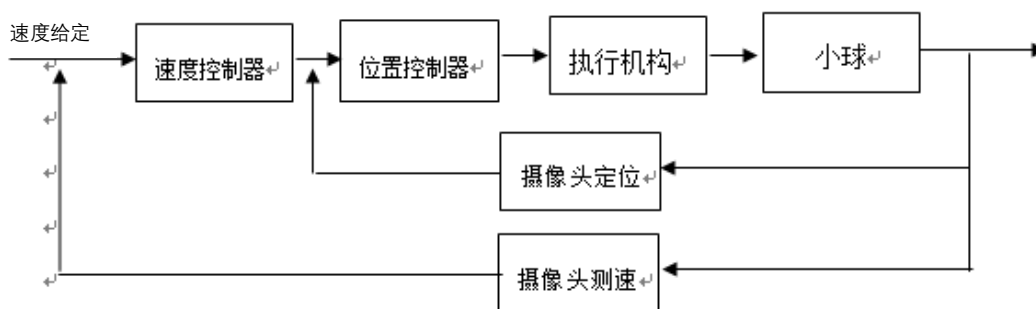
模糊 PID 算法通过摄像头模块采集到的小球坐标和速度,根据当前坐标和位置对 PID 控制器的 K_p 、 K_i 、 K_d 自发地进行调整,从而达到稳准快的控制效果。

我们设计的控制系统中,当小球在靠近平板边缘的区域时,增大比例环节系数 K_p ,以确保小球不滚落平板;同时通过对积分环节上下限进行限制,以减小超调。当小球在靠近平板中心区域时,减小比例环节系数 K_p ,以保证小球尽可能快速停留在目标点;同时加入积分环节,以实现精确定位。

所以我们采用了位置-速度-加速度串级模糊 PID 控制算法,小球的位置作为主控变量,速度和加速度为副控制量,同时在速度环和位置环都设计了模糊 PID 控制器,利用模糊控制器对电机进行控制。

5.2 控制算法

1) 速度-位置串级控制:



当前的串级控制仍为速度-位置双闭环控制系统,加速度-速度-位置三闭环控制系统仍

在改进中。在当前的速度-位置串级控制中，速度控制在外环，位置控制在内环，两者都通过摄像头进行数据反馈。

在控制过程中，我们根据位置的不同（即小球到目标点距离的远近）来设置速度给定，小球到目标点的距离越远，给定的速度越大。经过初步调试，速度给定 v （单位：mm/帧）与小球到目标点的距离 l （单位：mm）可以用分段函数来表示：

$$v_{\text{给定}} = \begin{cases} 4, & 300 < l \\ 3, & 200 < l < 300 \\ 2, & 130 < l < 200 \\ 0, & l < 130 \end{cases}$$

另外，考虑到平板摩擦力的影响，当小球距离目标点比较近的时候，由于平板倾斜角度较小，速度给定 v 为 0，平板具有一定的摩擦力三个原因，会导致小球静止在目标点附近的一点，无法及时到达目标点。因此，速度给定 v 还需满足以下条件：

$$v_{\text{给定}} = 3, \quad 15 < l < 60 \text{ 且 } v_{\text{实际}} \leq 1$$

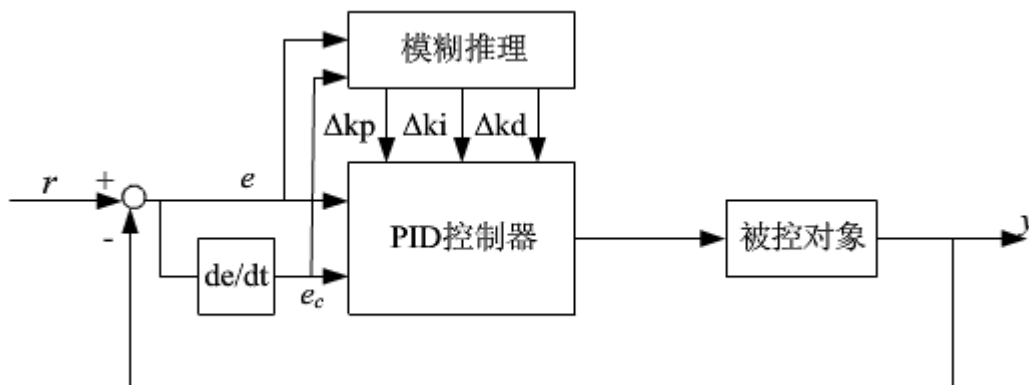
最后，还应对速度进行限幅，避免小球因速度过快冲出平板。速度给定 v 还需满足以下条件：

$$v_{\text{给定}} = 0, \quad v_{\text{实际}} \geq 5$$

2) 速度控制器采用 P 控制器

当前的速度控制器只采用了 P 控制器，其中系数 $K_p=10$ 。

3) 位置控制器采用模糊 PID 控制器



PID 控制要求对控制器的参数进行严格的整定，使得当参数变化时，PID 控制器参数不能随着被控对象的变化而作相应的调整，进行自我优化，导致系统超调量较大。

为了实现较为精确的控制，引入了模糊算法，提高控制精度。利用模糊控制规则输出修正量实时对 PID 进行参数修正，以满足不同误差和误差变化率对 PID 参数自调节的要求，从而使被控对象具有更加良好的动态特性和静态特性。

在这个位置控制器中，小球到目标点的距离即为误差 $|e|$ ，最终的目标是使误差 $|e|$ 为 0，即小球的位置与目标点重合。

(1) 参数整定原则

在 PID 参数的选取中，根据板球系统自身的特点，PID 参数应满足如下条件：

<1>当小球距离目标点较远时， $|e|$ 较大，为避免小球滚动速度过快， K_p 应取较小值，同时为避免系统的超调，因此 K_i 应取较小值或 0。

<2>无论小球距离目标点远近, K_d 都需要取值适中, 因此无需对 K_d 进行明显的模糊控制。

<3>当小球距离目标点较近时, $|e|$ 较小, 为克服平板摩擦力的影响, K_p 应取较大值, K_i 也应取较大值。

(2) 输入输出变量的模糊化

小球到目标点的距离 l 即为误差 $|e|$ ，选取之作为模糊控制器的输入变量。同时，选取位置控制器的 K_p 、 K_i 、 K_d 为输出变量。经过模糊化处理，得到模糊化输入变量 E 与模糊化输出变量 K_p 、 K_i 、 K_d 。

由于小球到目标点的距离不小于 0, 因此模糊化输入变量 E 的值都在不小于 0 的范围内取值。目前采用如下所示的输入变量模糊域:

e (mm/帧)	E
0-130	S
130-200	M
200-300	L
>300	XL

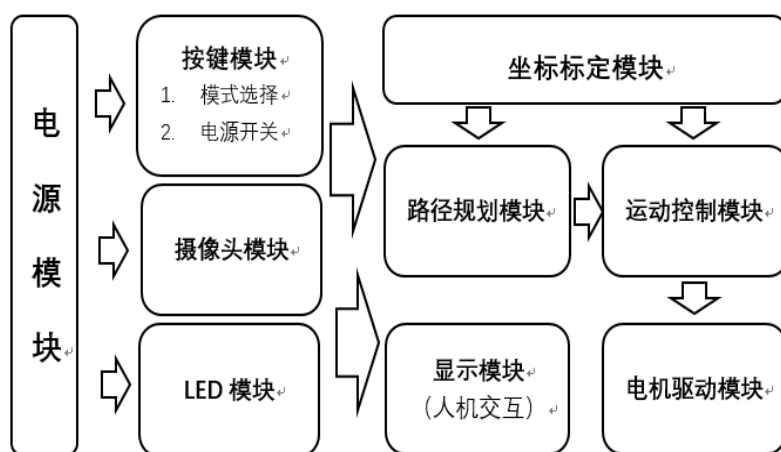
其中, S 为小, M 为中, L 为大, XL 为极大。

(3) 确定模糊规则

目前使用的模糊规则如下表所示：

E	K_p	K_i	K_d
S	12	0.25	4
M	8	0	4
L	6	0	4
XL	4	0	4

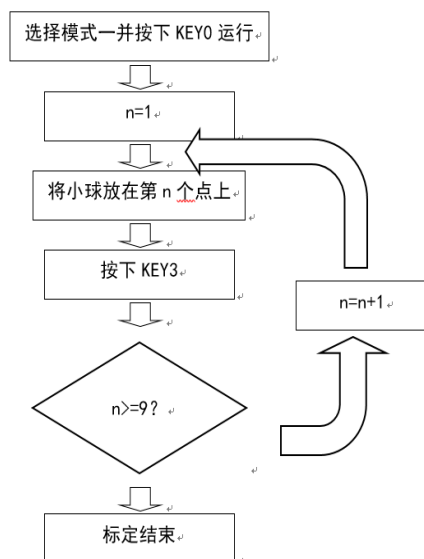
6. 模块化设计



6.1 坐标标定模块：

在测试现场复位板球控制设备时不可避免的出现定位偏差,因此每次对设备进行移动或拆卸组装时都需要重新对目标点进行定位操作,以便在之后的控制中使得小球准确的运动到平板画出的目标点上。模式一就是目标点现场标定模式,运行模式以后,将小球依次放置在1~9目标点上,每放置在一个目标点上,就按下KEY0一次,然后移动到下一个目标点,直

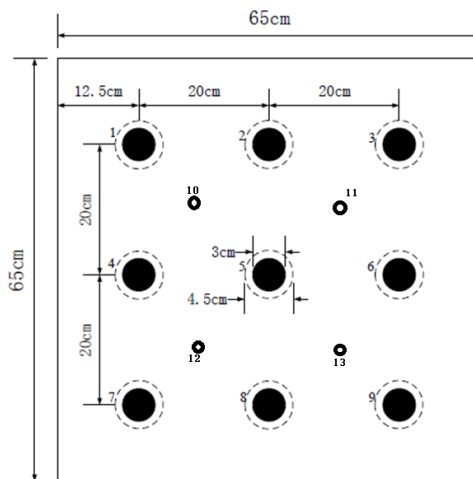
至九个目标点标定完成。



5.2 路径规划模块：

对于小球的路径，题目做出了如下要求：从一个目标点到另一目标点时，小球不能进入任何一个其他点的区域内；同时有些目标点需要停在区域内两秒钟以上，有些目标点穿过即可。针对以上要求，我们在目前的设计中做了两方面的主要工作：增加了四个虚拟目标点；将每个题目要求停留或穿过的目标点也进行了区分。

<1>增加的四个虚拟目标点分别为平板中心到四角的四个点的中点，如上图所示，分别命名为10~13。若从一目标点到另一目标点之间的连线经过其他无关点时，系统便能够自动规划路径，经过四个虚拟目标点中的几个，避开无关点，到达目标点。



<2>九个目标点既可以作为停留点，也可以作为穿越点，视具体问题而定，不同类型的点用到的算法也不同。

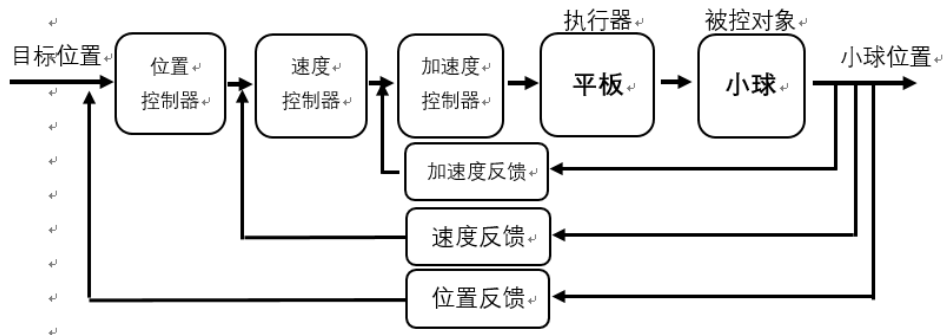
5.3 运动控制模块：

为使小球精确、快速的运动到目标点，需要有功能强大的小球运动控制模块做支撑：

<1>采用串级控制系统：通过摄像头采集到小球每一时刻的位置、速度，主回路为速度调节器，副回路为位置调节器，通过速度-位置串级控制系统对小球运动进行控制。

<2>采用模糊 PID 算法：对于小球的位置控制采用模糊 PID 算法。选择小球当前的位置为观测量，平板倾斜程度为控制量。将小球当前的位置与目标点之间的距离划分为四个模糊集，分别赋予不同的 PID 参数，能够快速、平稳的控制小球到达目标点。

<3>在改进方案中，我们还将加入加速度环，实现位置-速度-加速度串级控制。



位置-速度-加速度串级控制框图

5.4 电机驱动（脉冲）模块：



通过定时器中断 TIM6，以 0.1ms 为周期进入中断响应函数 TIM6_IRQHandler()。中断响应函数执行翻转 PF0 电平的操作，从而得到 5kHz 的脉冲信号，驱动四个步进电机转动。

五． 调试方法

(1) 烧录法：

这种方法简单有效，但是烧录次数极多，造成一定的麻烦。

(2) 改进方案 1：按键更改法

这种方法在比赛前期也用到过，只不过由于更换为最小系统板后只有两个按键而被迫终止。若之后确定用其他类型的单片机进行板球控制，这种方法会是一个可行的选择。甚至可以通过外接独立矩阵键盘的方式更改调试 PID 参数值，方便快捷有效。

(3) 改进方案 2：上位机更改法

通过上位机端与单片机建立通信连接，从而在电脑上直接输入 PID 参数值进行调试。这种方法的优缺点比较明显，优点是一旦能够成熟使用，效率会比其他两种方法高得多，也更加简单方便；缺点则是需要建立相对负责的通信连接，并在上位机上编写相关客户端进行修改，会在不必要的地方花费不少时间。