

# 1、底层

## 1.1 总线配置

CAN 总线	功能	电机类型	所属模块	通信/控制频率
CAN1	云台 pitch	6623	gimbal_task	1000 Hz
	云台 yaw	6623		
	左摩擦轮	GM3508	shoot_task	100 Hz
	右摩擦轮	GM3508		
	发弹拨盘	GM3508		
	TX2 通信	无	无	2.5 Hz (send)
CAN2	底盘主动轮 1	GM3508	chassis_task	100 Hz
	底盘主动轮 2	GM3508		

## 1.2 硬件线路

由于采用电滑环实现云台 yaw 轴 360° 转动，整机布线与步兵有较大差异。电滑环中的线路分为上下两部分，每部分各 12 线，上下一一对应，如下表所示：

序号	最大电流	上半部分接线	下半部分接线	功能
1	10A	裁判系统主控 24V 电源输出+	云台电源+	云台供电
2	10A	裁判系统主控 24V 电源输出-	云台电源-	
3	10A	降压模块输出+	TX2 电源+	TX2 供电
4	5A	降压模块输出-	TX2 电源-	
5	5A	底盘 CAN 线 H	主控板 CAN2 H	底盘控制
6	5A	底盘 CAN 线 L	主控板 CAN2 L	
7	5A	裁判系统主控串口 TX	主控板串口 6 RX	获取裁判系统数据
8	5A	裁判系统主控串口 GND	主控板串口 6 GND	
9	5A	裁判系统航空接头	测速模块航空接头	枪口测速
10	5A			
11	5A			
12	5A			

## 1.3 云台驱动

基于步兵框架，pitch 轴反馈来自电机码盘，yaw 轴反馈来自 IMU，yaw 轴采用绝对角度以进行 360° 旋转。底层驱动方式与步兵相同，也采用位置环和速度环进行 PID 控制，仅调整了 PID 参数。由于结构差异，云台 yaw 轴惯量较大，响应较慢，而 pitch 轴在不同角度下控制力矩变化较大，枪口长时间处于较高或较低位置时电机容易过热。

## 2、上层

### 2.1 主要性能

参数	值	备注
底盘最高运动速度	0.84m/s	驱动轮直径偏小
发射机构最高射速	>40m/s	通过连接服务器测得
持续射击射速波动范围	14m/s~20m/s	
有效打击距离范围	0.85m~4m	近似值，存在较大误差
云台俯仰角范围	-28° ~0°	

### 2.2 云台功能

#### 2.2.1 自动瞄准

主控板接收 TX2 发送的目标信息，以此为反馈来源对云台进行闭环控制，使枪口跟随相机视野中的敌方目标。

TX2 通过 CAN 总线发送识别到的目标的笛卡尔坐标，以及所识别目标的装甲板类型，识别到的目标坐标具体指装甲板中心在相机坐标系下的 xyz 坐标值，而装甲板类型主要用于区分目标是否是敌方英雄，对于步兵和工程无法区分。在不显示图像时发送帧率达到约 45 FPS，在没有识别到目标的情况下 TX2 不会发送数据。

在自动瞄准过程中，云台 pitch 轴的 PID 位置环参数与手动控制模式不同，其余参数均相同。

瞄准流程如下：

1. 接收到数据后解析得出目标坐标和装甲板类型
2. 进行坐标变换
3. 计算云台理论转角
4. 修正理论转角获得实际增量角度值
5. 根据当前云台角度获得目标角度值
6. 计算电流值并发送到电调
7. 重复以上步骤

#### 坐标变换：

接收到的目标坐标数据是相机坐标系下的，需要转换到世界坐标系以进行理论转角计算。

将世界坐标系建立在哨兵底盘上，以云台 yaw 轴与 pitch 轴的空间垂足为原点(位于 yaw 轴上)，规定云台 yaw 轴竖直向下为 y 轴，pitch 轴水平时枪口方向为 z 轴正方向，最后以右手系确定 x 轴，完全确定世界坐标系。

构建世界坐标系后，推导从世界坐标系到相机坐标系的齐次变换矩阵，然后计算世界坐标系下的目标坐标。首先从原点开始，平移到 pitch 轴与枪口轴线的交点，然后绕 pitch 轴旋转当前 pitch 角，再平移到相机，即与当前枪口姿态下的相机坐标系重合。

理论计算步骤如下：

1. 构建  $4 \times 4$  单位矩阵
2. 右乘平移齐次变换矩阵，其中平移向量为原点指向 pitch 轴与枪口轴线的交点
3. 右乘旋转齐次变换矩阵，其中旋转矩阵为绕 x 轴旋转  $\theta$  角， $\theta$  为当前云台 pitch 角
4. 右乘平移齐次变换矩阵，其中平移向量为 pitch 轴与枪口轴线的交点指向相机
5. 右乘相机坐标系下目标坐标组成的  $4 \times 1$  列向量，获得世界坐标系下的目标坐标

所有需要的矩阵运算已经自行编写好并封装于 matrix.c 中，理论计算结果在 matlab 中进行比对，正确性已得到验证。

#### 云台理论转角的计算：

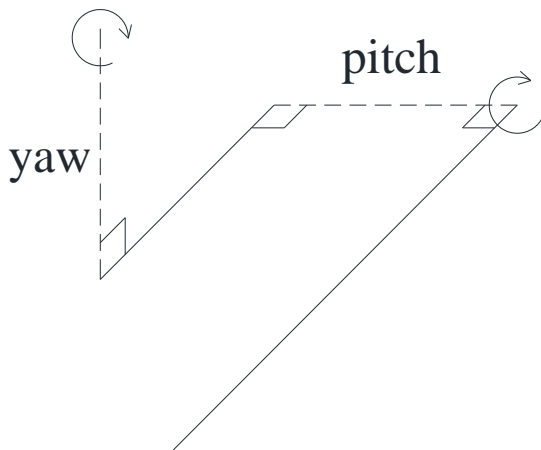


图 1 云台转轴示意图

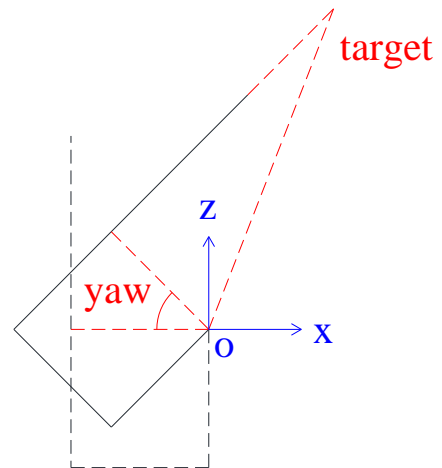


图 2 云台 yaw 轴瞄准过程俯视图

获得瞄准目标的世界坐标后，需要转动云台，使枪口轴线与目标点重合。当云台 yaw 轴从正前方  $0^\circ$  开始转动直到瞄准目标时，如图 2 所示，转过的角度为 yaw，即云台需要在当前方向下旋转角度 yaw（云台当前方向不一定是正前方）。计算 yaw 角度值的步骤如下：

1. 将目标点投影到 xoz 平面
2. 求出投影点与原点构成向量与 z 轴的夹角 angle1
3. 求出投影点、原点与枪口轴线所构成直角三角形 O 顶点的夹角 angle2
4.  $\text{yaw} = 90^\circ - (\text{angle2} - \text{angle1})$

由于转轴没有偏移，pitch 角的计算相对更简单，pitch 轴与枪口轴线的交点、目标点与投影点构成竖直平面内的直角三角形，只需要计算交点夹角就直接获得目标 pitch 角而不是角度增量，但需要注意的是由于旋转了 yaw 角，pitch 轴与枪口轴线的交点坐标已经变化，需要根据 yaw 进行计算。

#### 注意：

坐标变换与云台理论转角计算方法的有效性已在初代哨兵上验证，但由于新哨兵的机械结构变化，枪口的 L 型结构从 pitch 轴换到了 yaw 轴上，引起 pitch 轴与 yaw 轴的耦合作用，导致瞄准过程中 yaw 轴角度发散，因此不再采用坐标解算方式来获得 pitch 角度值，最后采用混合方式，即 yaw 轴角度通过消除 pitch 轴输入影响的理论模型计算，pitch 轴角度的计算方式为直接将相机坐标系下的目标坐标 y 轴分量作为偏差值乘以系数 kp 来获得 pitch 角增量（本质上与步兵所采用的像素偏差值方法相同）。由于备赛时间和精力有限，在基本达到自瞄效果后一直使用这种临时方法。

### 理论转角的修正：

由于存在安装误差、子弹下坠等因素，按照理论转角转动后的云台可能无法击中目标，因而需要通过实际测试来进行角度修正。

对于 yaw 轴，可以直接在坐标解算的过程中进行修正，即对目标坐标的 x 分量额外增加固定的偏移值；对于 pitch 轴，由于不同距离子弹下坠存在差异，采用分段方式进行修正，将目标距离（坐标 z 分量）划分为多个区间，在不同区间采用不同的坐标偏移值进行修正。

为了便于在实际测试过程中快速确定修正值，在自动瞄准状态下增加了修正操作，可以直接通过遥控器云台控制摇杆实时改变修正值，在实际射击命中效果满足要求后，可以通过调试窗口或 jscope 读出修正值并记录。

## 2.2.2 自主射击

自主射击的要点在于发弹量的控制，需要根据不同的策略来决定。如果一旦发现目标就进行射击，能够达到火力压制的效果，但命中率较低，为了提高射击精度和节约子弹，可以通过设置阈值来控制是否射击，即目标的坐标在给定范围内则进行射击。由于 pitch 轴角度变化较小，目前只针对水平方向设置射击阈值，对于敌方英雄，即大装甲板的情况下，可以设置 2 倍的阈值。对于射频，由于拨盘在位置环控制下转速过高，哨兵直接采用速度环进行控制。

## 2.2.3 枪口热量控制

通过裁判系统反馈的热量值进行简单的闭环控制，设置了两个热量阈值，当枪口热量处于两个阈值中间时降低射频，超出第二个阈值时拨盘直接停转。

## 2.3 底盘功能

与步兵不同，哨兵底盘只有两个驱动轮，另外两个为从动轮，且驱动轮任何时刻转向和转速均相同，不需要进行全向速度分解。底盘的移动是哨兵自主巡航和躲避敌方攻击的手段，需要注意的是，由于存在敌方拿到一血的情况下哨兵底盘会临时断电，此时检测到底盘电机离线，底盘移动里程计暂停工作。

### 2.3.1 边界设置

为了在比赛期间能够根据局势和策略灵活调整哨兵的巡航和规避运动范围，增加了通过遥控器实时改变哨兵运动范围边界的功能。在手动控制模式下，可以通过遥控器的底盘控制摇杆重设第一边界，然后在手动操作哨兵移动的过程中自动记录移动距离，在切换到自动模式后以切换时的位置为第二边界，之后在此边界范围内进行运动。

边界设置的思路是规定第一边界的位移为 0，第二边界的位移为手动控制哨兵移动后的相对移动距离。移动距离通过底盘电机码盘进行测量，即电机转子转过的角度值。在重置边界时，记录当前转子角度值并将之设为零点。在移动过程中，不断读取新的角度值并转换为距离值，同时以当前

距离作为第二边界。

当移动方向相反时会出现第二边界为负值的情况，此时需要进行反转，将两个边界取反对调，保证第一边界为 0 而第二边界为正值，同时重置电机转子零点。需要注意的区别是，哨兵在该情况下切入自动模式时位移为 0，位于第一边界上，而不是位于第二边界上。

2.3.2 随机运动

随机运动是目前最有效的规避方式，主要思路是随机设定每次移动的距离和速度，按照设定移动到目标距离后再重新设定下一次移动的距离和速度。由于哨兵的最高移动速度较低，直接以最高速度作为移动速度，仅随机改变移动方向，后续提高最高移动速度后可以考虑变速运动以增加规避的随机性。

在控制过程中以绝对目标的方式设定移动距离，即指定需要移动到的目标位置。设定随机移动距离的核心是使用随机数来确定距离的大小，为了达到更好的效果，定义了每次移动的最小距离和最大距离，移动方向由目标位置和当前位置的相对关系确定。

2.3.3 往返运动

往返运动是相对规律的规避方式，在敌方进行手动瞄准时，可以通过预判进行打击，因而对手动瞄准的规避效果较差，但对于自动瞄准，如果跟踪效果较差，只要保证移动速度足够快，在移动过程中也不会被击中。实现往返运动比较简单，只需要确定移动速度和方向，在移动到边界时将速度取反。

2.4 其他功能

2.4.1 操作方式与保护机制

左挡位（SW1）	模式	右挡位（SW2）	操作功能
上（RC_UP）	自动模式	上（RC_UP）	无
		中（RC_MI）	识别红装甲
		下（RC_DN）	识别蓝装甲
中（RC_MI）	测试模式	上（RC_UP）	无
		中（RC_MI）	无
		下（RC_DN）	无
下（RC_DN）	手动模式	上（RC_UP）	触发射击
		中（RC_MI）	识别红装甲
		下（RC_DN）	识别蓝装甲

在手动控制模式下，左摇杆控制云台，右摇杆水平方向控制底盘左右移动，右摇杆向下拨到底时重置第一边界。在设置移动边界时，首先移动到第一边界位置，然后将右摇杆向下拨到底设置第

一边界，回中后再移动到所需的第二边界位置，再切换到测试模式，完成边界设置，之后哨兵开始在边界内随机巡航。在切换模式前，可以通过右挡位（SW2）设置识别的目标装甲颜色，也可以在切换到自动模式后再设置。

测试模式和自动模式基本一致，主要区别在于测试模式下即使识别到敌方目标也不会触发射击。测试模式主要用于调试以及观察巡航运动是否满足要求，在比赛时需要从测试模式切换到自动模式，完成切换后会根据参数进行倒计时，期间不再识别敌方目标。倒计时主要用于防止误识别，避免出现三秒钟准备期间误射己方单位的情况。

在测试模式和自动模式下，无法再控制底盘运动，只能在自动瞄准过程中对云台的瞄准进行修正微调。手动修正的方法是目标装甲板静止，哨兵识别到并瞄准至云台稳定后，通过遥控器左摇杆调整修正量，左右对应 yaw 轴修正，上下对应 pitch 轴修正，修正过程中可以明显观察到激光的偏移。

#### **保护机制：**

在任何模式下，关闭遥控器开关后哨兵云台和射击系统都会停止工作，此时摩擦轮停转，激光器关闭，可以随意拨动云台，起到保护云台电机、摩擦轮电机和降低耗电量的作用，同时也便于烧写程序和退出调试模式，因为此时摩擦轮不会因失去控制信号而持续加速，避免枪口走火。

### **2.4.2 状态切换逻辑**

作为攻击和防御的关键系统，云台和底盘有各自独立的模式状态。由于采用了防御优先的策略，底盘的规避运动优先级更高，但由于云台的状态是独立的，与底盘无关，因此在规避过程中云台也会攻击识别到的敌方目标。

底盘的状态有巡航、随机躲避、往返躲避和跟随三种，默认状态是巡航状态（初代哨兵的巡航是规律的往返运动，新哨兵则是随机运动），在受到攻击时会首先进入往返运动躲避状态，在此期间若 5 秒内没有继续受到攻击，则会退回巡航状态；若在首次受到攻击后的连续 8 秒内没有退回巡航状态，则会改变规避模式，进入随机运动躲避状态。在两种躲避状态下，若受到攻击后的连续 8 秒内都没有退回巡航状态，则会切换到另一种躲避状态。

在程序中没有使用的是跟随状态，即在识别到敌方目标并且没有受到攻击的情况下会跟随云台运动，使枪口保持在一定范围内正对目标，宏观表现为哨兵在轨道上追着目标打。没有使用该状态的原因是在对抗过程中哨兵受到攻击的概率增加，不利于生存。

### **2.4.3 离线模块检测**

开机后哨兵会持续对各模块进行检测，确保出现模块离线时能够最快定位问题。在头文件中所定义枚举类型的顺序即为离线模块检测的优先顺序，当检测到离线模块时，蜂鸣器会警报最先检测到的离线模块，根据鸣响的次数可以快速确定离线模块。

在离线检测模块中可以设置忽略的模块，例如，TX2 在没有识别到目标时不会发送数据，此时通信正常但会误报离线。

### **2.4.4 异常状态检测**

目前的异常状态包括摩擦轮电机堵转、边界设置异常两种。

摩擦轮电机堵转指上电后，由于枪口内部的剩余子弹位于两个摩擦轮中间，电机起转力矩不足导致摩擦轮无法转动，此时发射机构瘫痪，即使拨盘转动也无法正常射击，解决方法是手动拨动摩擦轮使子弹弹出。该异常的检测方法是判断摩擦轮电机反馈转速是否为零。

边界设置异常指开机后没有设置有效边界，直接从手动模式切换到测试模式，此时由于移动范围过小，底盘规避运动失效，需要切回手动模式重新设置移动边界。该异常的检测方法是判断第一边界和第二边界的差值是否小于预设值。