

第二十二届全国大学生机器人大赛

RoboMaster 2023 超级对抗赛

太原理工大学 TRoMaC 战队

## 英雄技术方案



## 前言

本文档由太原理工大学 TRoMaC 战队编制，适用于 RoboMaster 2023 机甲大师超级对抗赛。主要撰写人员包括：

模块	撰写人员 1	撰写人员 2
机械	柴夕泽	
硬件	李香林	
软件	李纪扬	
算法	李弘毅	
其他	王程凌	



# 目录

前言.....	i
1 概述.....	1
1.1 背景与目标.....	1
1.2 其他学校机器人分析综述.....	2
1.2.1 大连理工大学.....	2
1.2.2 上海交通大学.....	3
1.2.3 桂林电子科技大学.....	3
1.2.4 北京科技大学.....	4
2 机器人功能定义.....	5
3 机器人核心设计参数.....	6
4 设计方案.....	10
4.1 机械结构设计.....	10
4.1.1 整体设计说明.....	10
4.1.2 核心结构设计说明.....	11
4.2 工艺选择.....	20
5 硬件设计.....	22
5.1 整机硬件方案框图.....	22
5.1.1 电源走向.....	22
5.1.2 信号走向.....	23
5.2 硬件详细设计.....	24
5.2.1 主板.....	24
5.2.2 超电.....	24
5.3 关键器件选型.....	26
5.3.1 电源部分.....	26
5.3.2 陀螺仪.....	28
5.3.3 调试接口.....	28
5.3.3 布线优化.....	28
6 软件设计.....	30

6.1 系统架构.....	31
6.2 第三方中间件.....	32
6.3 宿主机环境.....	32
6.4 调试环境.....	32
6.5 运行流程.....	33
6.5.1 云台程序运行流程.....	33
6.5.2 底盘程序运行流程.....	36
7 算法设计.....	41
7.1 搭载平台.....	41
7.2 主要功能.....	42
7.3 总结.....	45
8 研发迭代过程.....	46
8.1 测试记录.....	46
8.2 版本迭代过程记录.....	50
8.3 重点问题解决记录.....	51
9 团队成员贡献.....	54
附录 1 STM32F407VET6 主控板原理图 .....	55
参考文献.....	56

# 1 概述

## 1.1 背景与目标

英雄机器人作为 RoboMaster 赛场传统机器人之一，是击打建筑单位的主力。尤其在 2022 赛季增加的狙击点增益使得像我们这样不具备打符能力的队伍也有通过吊射翻盘的可能。并且英雄机器人的稳定性与发射的命中率是队伍获胜的重要保障，如果英雄机器人出现问题，自家进攻的节奏会被严重拖慢，大大降低获胜机会。

相较 2022 赛季分区赛的规则，2023 赛季的英雄机器人相关的规则变化：

1. 增加了远程兑换弹丸的机制，意味着在获得经济后不需要再回补血点也可以补给弹丸，使英雄机器人击打建筑的节奏加快；
2. 前三分钟对前哨站造成 500 点伤害会获得经验加成，意味着吊射可以帮助队伍建立等级优势。

## 1.2 其他学校机器人分析综述

2023 赛季结束后，我队重点对以下几类英雄机器人进行分析：

1. 分区赛中表现亮眼的英雄机器人
2. 与我们战术定位相同的英雄机器人
3. 采用独特结构的英雄机器人。

机械结构皆依靠开源或者与他队队员交流得知。

### 1.2.1 大连理工大学

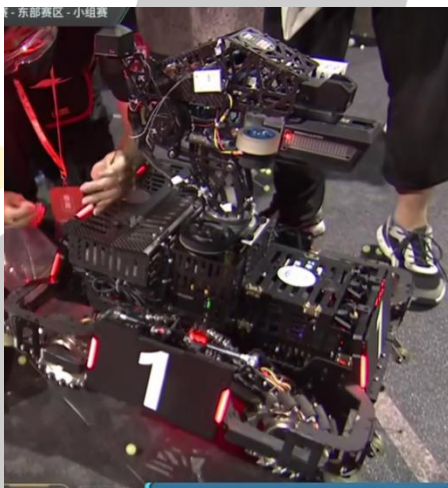


图 1-1 大连理工大学英雄机器人

技术亮点：V 型槽发射机构，并联自适应悬挂机构

战场表现：12m 吊射连续击中小装甲

## 1.2.2 上海交通大学



图 1-2 上海交通大学英雄机器人

技术亮点：自适应悬挂，反小陀螺自瞄

战场表现：因其稳定的中距离击打能力和灵活的机动性，在与对方机器人发生静距离战斗中屡屡获得优势，成为 21 赛季获得最多击杀数的英雄机器人。

## 1.2.3 桂林电子科技大学



图 1-3 桂林电子科技大学英雄机器人

技术亮点：气动发射，

实战效果：能够在环形高地稳定吊射旋转装甲板，弹速波动在 0.4m/s 弹道稳定。通过调整快排阀的速率手动调参，能够在场地间灵活快速运动，在 2022 赛季南部区域赛四强争霸中通过灵活快速到达敌方哨兵并快速击打极限反杀。

## 1.2.4 北京科技大学

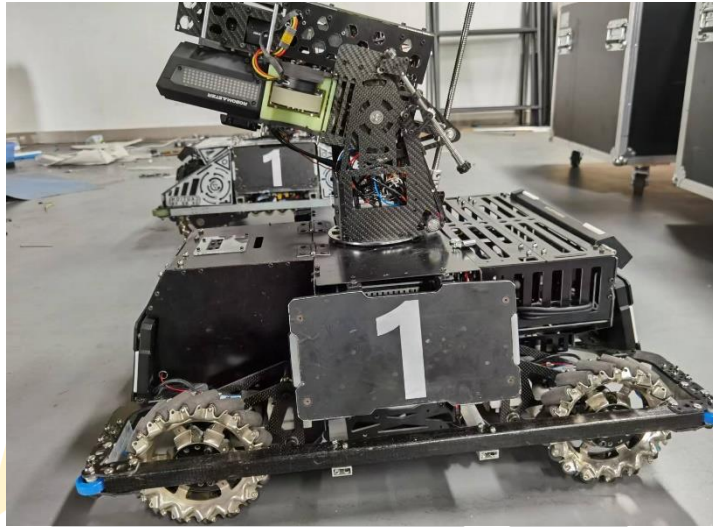


图 1-4 北京科技大学大学英雄机器人

技术亮点：丝杠云台，重力补偿，自适应悬挂

效果表现：10m 可连续命中小装甲 5 发，且具有稳定飞坡的能力和高机动性，可实现大仰角吊射，距离更远，且丝杠相对电机存在自锁，更为稳定。



## 2 机器人功能定义

通过对英雄机器人性能分析，结合本赛季规则。我们首先对机器人功能进行了定义，如图 2-1 是对英雄机器人在设计初期进行部分功能描述的定义图。

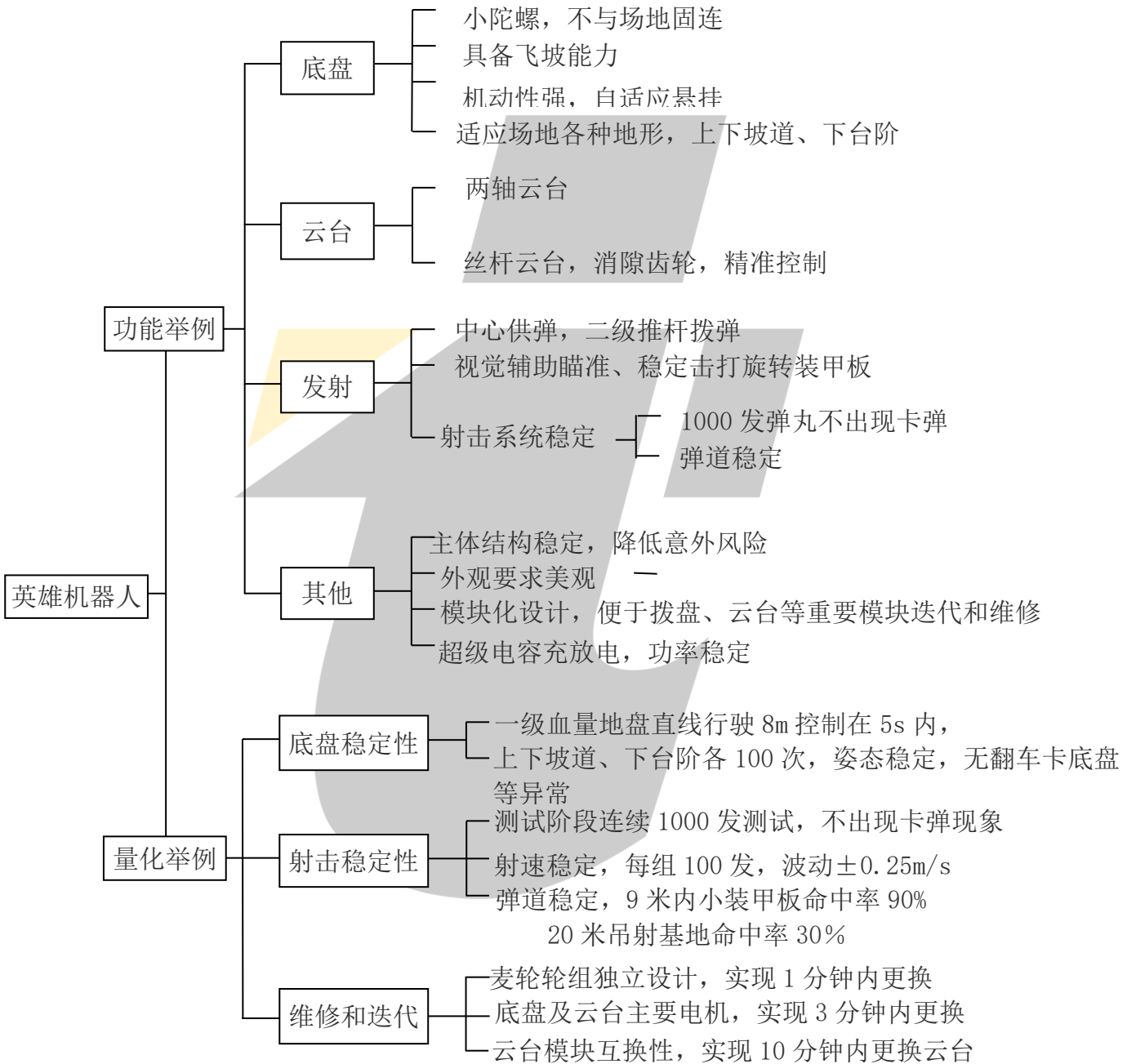


图 2-1 机器人功能定义图

### 3 机器人核心设计参数

根据英雄机器人的功能定义，我们进行了机器人的机械结构设计，表 3-1 列出的是机器人的整体机械参数。

表 3-1 机器人整体机械参数

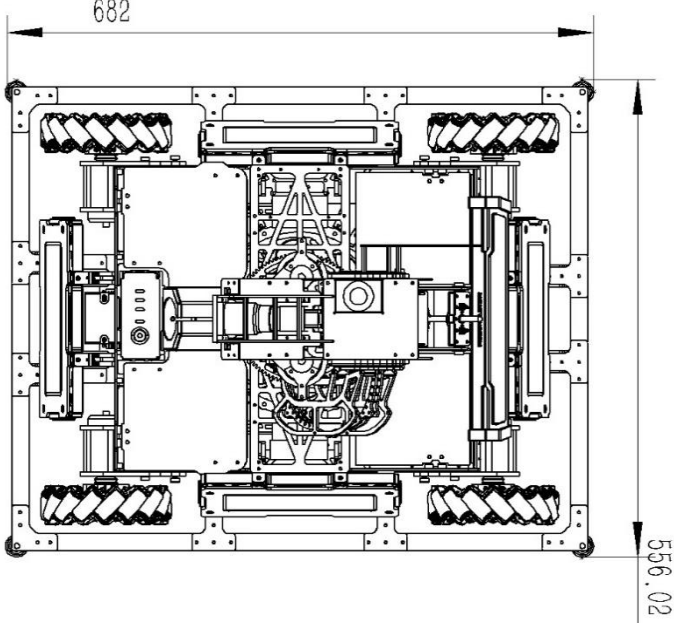
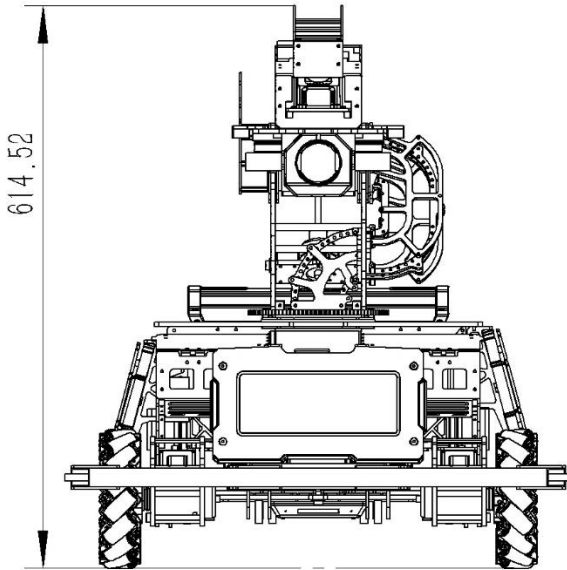
底盘尺寸(mm)	682*556.02	机器人质量(kg)	实物质量 23
			
机器人高度(mm)	614.52		
			

表 3-1 机器人整体机械参数续表

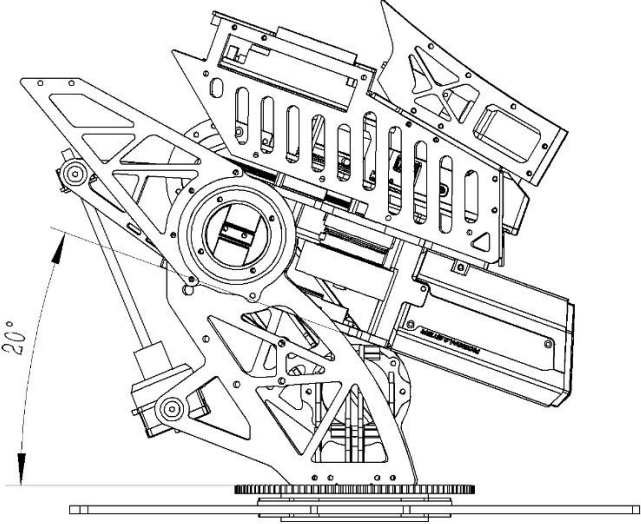
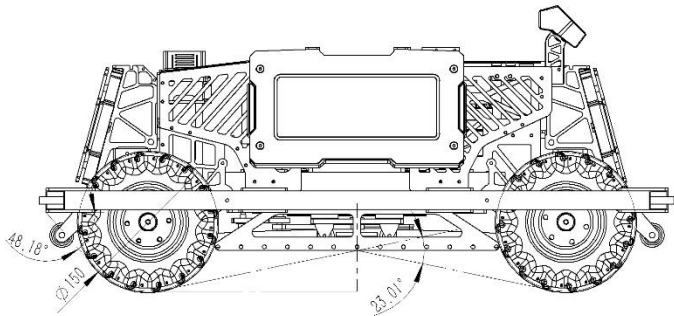
机器人质心高度(mm)	219mm

机器人底盘及云台参数如表 3-2 所示。

表 3-2 底盘及云台参数

仰角 (°)	44°

表 3-2 底盘及云台参数续表

俯角 (°)	20
	
接近角 / 通过角 (°)	48.18 / 23°
	

执行器、传感器类型及用途说明

1. 云台共使用 5 个电机，功能及型号见表 3-3。

表 3-3 云台电机类型及用途说明

摩擦轮电机	推杆电机	Yaw 轴电机	Pitch 轴电机	传感器
M3508*2	M3508*1	GM6020	M3508*1	微动开关

2. 底盘共使用 8 个电机和 4 个磁编码器，功能及型号见表 3-4。

表 3-4 底盘执行器、传感器类型及用途说明

轮组驱动电机	中心供弹拨盘电机
M3508*4	M3508*1



## 4 设计方案

### 4.1 机械结构设计

#### 4.1.1 整体设计说明

底盘设计思维导图如图 4-1 所示，从场地环境和战队自身需求出发，最终收敛到具体设计方案。

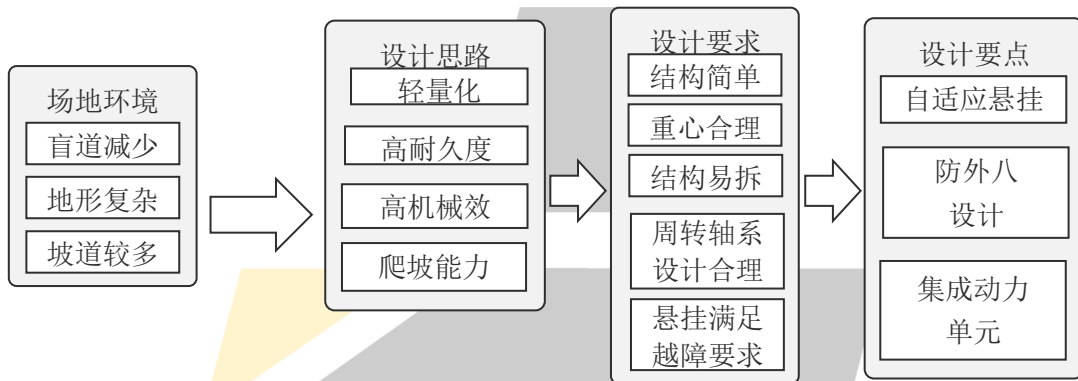


图 4-1 底盘设计思维导图

云台的主要设计思路是围绕设计性能制定，思维导图如图 4-2 所示。

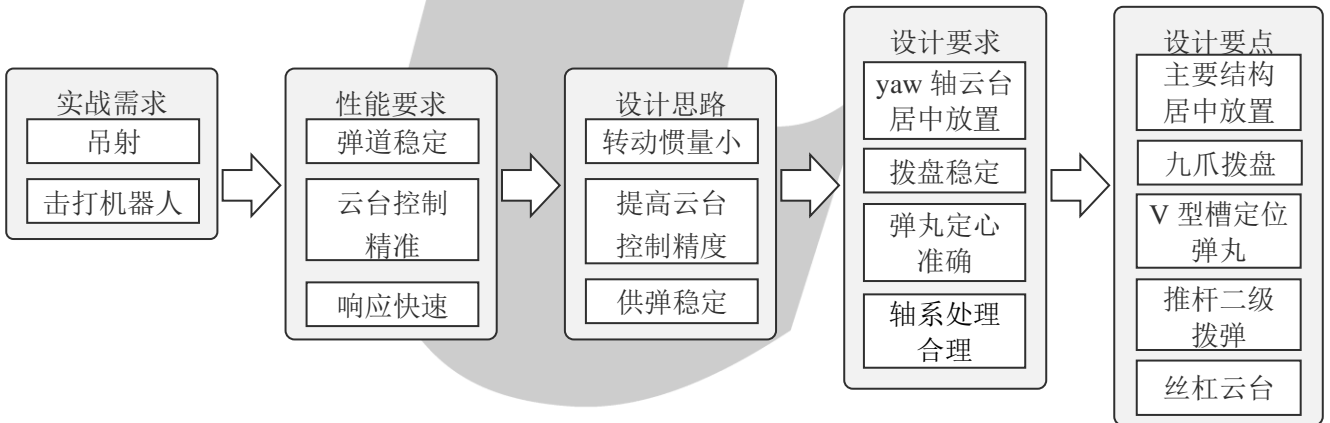


图 4-2 云台设计思维导图

考虑到机器人的基本性能需求还是机动性和稳定性，为了降低质量、提高运动特性、提高射击稳定性，最终我们的设计方案确定为：自适应悬挂底盘的丝杠云台推杆二级拨弹下供弹英雄机器人。设计中，自适应悬挂、丝杠云台、推杆拨弹、下供弹链路等部分是我们主要的研发内容和成果。

## 4.1.2 核心结构设计说明

### 4.1.2.1 发射机构设计

#### 1. 需求分析

根据规则和战队战术设计，制定了英雄性能期望值，见表 4-1。

表 4-1 发射机构需求列表

项目	指标
射频	稳定不卡弹，2 发/s
射速	最快可达到 16m/s，可调节
弹舱容量	至少容纳 50 发弹丸
射击精度	8m 距离小装甲板命中率 100%
发射机构	供弹链路及发射机构稳定，轻量化，可快速拆换整体模块或重要零件

传统英雄机器人的发射流程依次为拨盘，链路，单发限位，摩擦轮以及测速模块。因此提高发射命中率需要对这五个组成部分进行分析。

#### 2. 推杆结构

首先，精准的弹道需要满足每颗弹丸进入摩擦轮前尽可能保持相同的姿态，我队 2022 赛季的英雄机器人采用的是中心供弹结构，需要通过挨个挤压弹丸，将弹丸推到单发限位前，经过一个赛季的使用，我们发现它存在以下弊端：

- 1) 拨盘轴系的 U 形轴承经过长时间的使用导致游隙增大，同时拨爪也会存在磨损导致存在虚位，使拨盘的控制难度加大，导致每颗弹丸进入单发限位的初速度和推力不同；
- 2) 链路长时间使用会使链路系统阻力不均，也会影响每颗弹丸的复现性；
- 3) 对于如图 1.5-3 所示的链路设计，无法保证弹丸在不同俯仰角下通过链路与 pitch 转轴的连接部分的长度相同，因此通过对拨盘的控制难以保证弹丸进入摩擦轮的初始姿态相同。



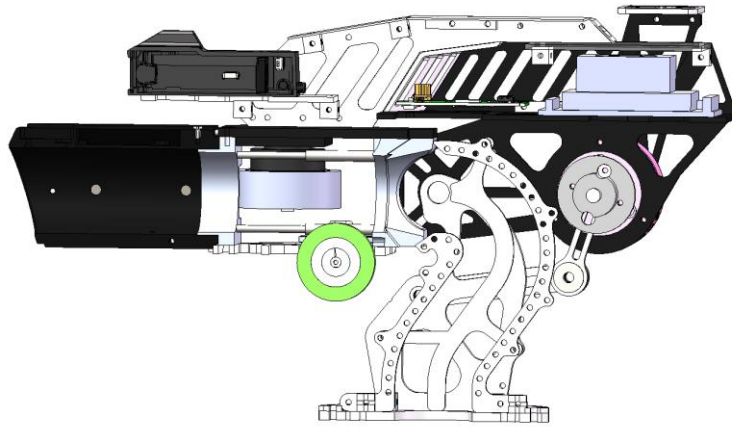


图 4-3 上一代云台图纸

针对以上问题，我队创新的采用推杆设计，对每个弹丸进行单独直接的控制，从而解决上述无法通过拨盘的控制达到高复现性的问题。推杆动力源采用 M3508 作为动力源，齿轮齿条结构实现直线运动。如图 4-4 推杆云台图纸。

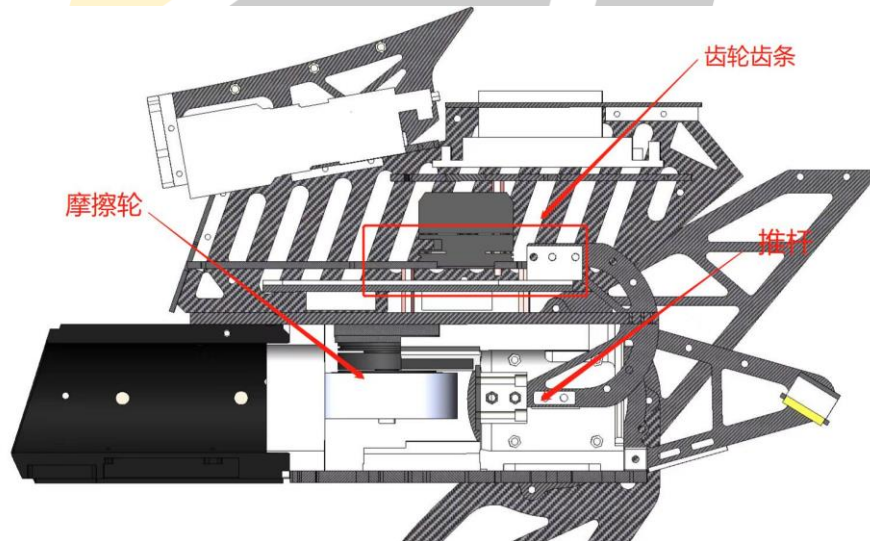


图 4-4 推杆云台图纸

### 3. 单发限位

由于采用推杆结构，所以对单发限位的要求不高，对弹丸起到定心作用即可。单发限位机构使用由拉簧提供张紧力的铰链机构，可以通过更换拉簧调节限位张紧力，当铰链机构张开，弹丸可以通过。当弹丸刚好接触摩擦轮将被击发时，限位机构将弹丸下压在定位槽上，以保证每一颗弹丸在发射前与摩擦轮的相对位置相同，达到定心目的。



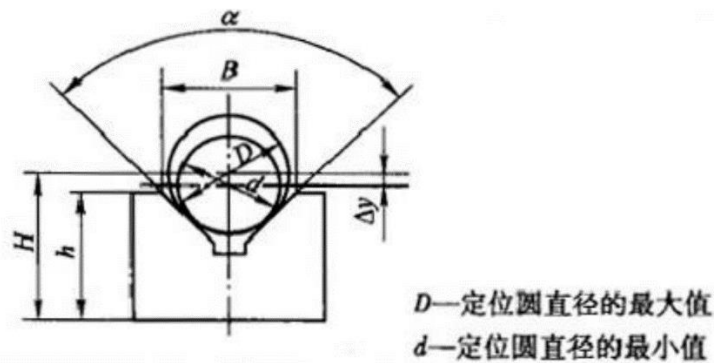


图 4-5 定心分析图

定位采用 V 型槽定位，弹丸在发射前的定位方式是由限位装置下压在打印件的 V 型槽上，使弹丸同时与 V 型的两个平面相切。如表 4-2 为 V 形块的尺寸及定位误差的计算公式。当工件以外圆柱面与 V 形块配合定位时，会由于定位不准造成工序尺寸或位置要求方面的定位误差。

表 4-2 定心计算公式

计算项目	符号	计算公式			
V 形块的作用角度	$\alpha$	$\alpha$	$60^\circ$	$90^\circ$	$120^\circ$
V 形块基面到定位圆心的距离	H	$H = h + \frac{D}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} - \frac{B}{2 \tan \frac{\alpha}{2}}$	$H = h + D - 0.886B$	$H = h + 0.707D - 0.5B$	$H = h + 0.577D - 0.289B$
V 形块的开口尺寸	B	$B = 2 \tan \frac{\alpha}{2} \left( h + \frac{D}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} - H \right)$	$B = 1.155(h + D - H)$	$B = 2(h + 0.707D - H)$	$B = 3.464(h + 0.577D - H)$

表 4-2 定心计算公式续表

计算项目	符号	计算公式			
定位误差	$\Delta\gamma$	$\Delta\gamma = \frac{D-d}{2 \sin \frac{\alpha}{2}}$	$\Delta\gamma = D - d$	$\Delta\gamma = 0.707(D - d)$	$\Delta\gamma = 0.577(D - d)$

为使定位误差对称分布，在计算 V 形块尺寸 H 和 B 时，公式中的 D 值可取定位面的中间尺寸，即  $1/2 (D+d)$ 。此时定位误差： $\Delta\gamma = \frac{D-d}{2 \sin \frac{\alpha}{2}}$

同时，V 形块的工作角度  $\alpha$  越大，定位误差越小，但工作角度  $\alpha$  越大，定位稳定性越差。因此最终选取  $90^\circ$  作为弹丸定位角度。(D 取 43mm，d 取 42mm，计算得出 B=32.531mm，H=23.500mm， $\Delta\gamma=0.353\text{mm}$ )

同时对炮管打印件增加定位销。定位销与销孔的配合采用过度配合。如图 4-6 定位销位置设计图

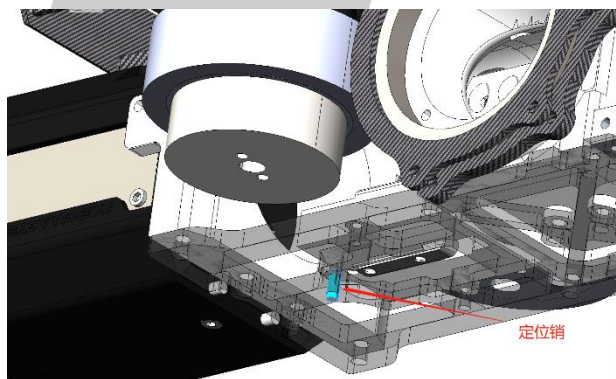


图 4-6 定位销位置设计图

#### 4. 摩擦轮

摩擦轮是发射的重要组成部分。为了保证其性能，我们采用了去掉减速箱的 3508 电机，具有较高力矩和转速反馈特性。为了避免摩擦轮挤压弹丸时固定板弯曲，我们采用多层玻璃纤维板进行固定，并通过定位销定位来提高安装精度。同时，在固定板上设计了 M3508

电机凸台的定位孔，再在摩擦轮轮毂上设计了 M3508 电机转子凸台的定位孔，以提高整个系统的安装精度。具体摩擦轮轮毂结构请参见图示。我们经过赛季初多次测试后，最终决定采用邵氏硬度为 50A、直径为 60mm、间距为 98mm 的摩擦轮。如图 4-7 摩擦轮设计图。

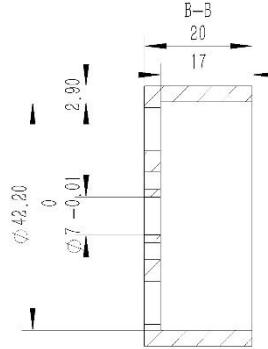


图 4-7 摩擦轮设计图

由于发射过程过于复杂，难以对整个发射过程进行动力学建模，粗略对摩擦轮进行建模可知摩擦轮转动惯量越大，发射弹丸对摩擦轮掉速的影响越小。因此我们通过给摩擦轮增加配重 200g 来提高转动惯量。

发现加配重摩擦轮转速达到 4800 和不加配重摩擦轮达到 6000 可以使弹丸达到相同的速度，且加配重更加稳定，弹速稳定在 0.7m/s 的区间内。如图 1.5-8 弹速波动图

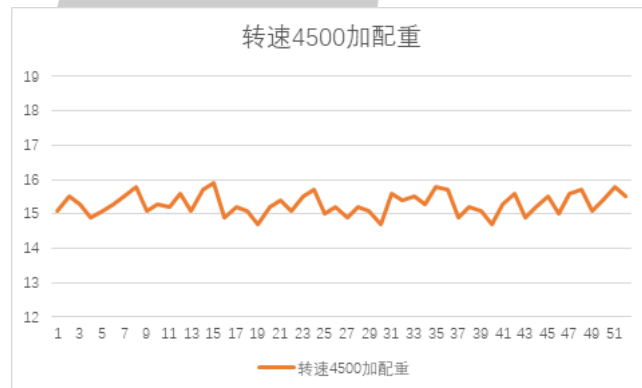


图 4-8 弹速波动图

### 4.1.2.2 云台结构设计

#### 1. 需求分析

云台架起承载云台体连接底盘的功能，主要包括 Yaw 、Pitch 轴、Y,P 两轴的传动机构与支架。对于远距离吊射，Yaw 、Pitch 轴精准控制的重要性不言而喻。

#### 2. 云台结构设计

由于丝杠传动具有精度高的优点，十分适合控制云台 Pitch 轴的俯仰。因此我们云台的传动结构为丝杠加连杆的结构。为了减小丝杠受到的径向力，我们将丝杠的连接设计成铰链。并且采用挠性联轴器与 M3508 转子连接，即使受到径向力导致偏心或存在装配误差的情况下也能达到精准传动的效果。丝杠螺母镶嵌在打印件中上下两边通过板材进行限位，并靠螺栓的预紧力夹紧。在镶嵌螺母位置处打热熔胶防止应力集中，为了减小丝杠螺母本身存在的游隙，采用两个丝杠螺母相差导程整数倍数的距离安装，消除效果良好。

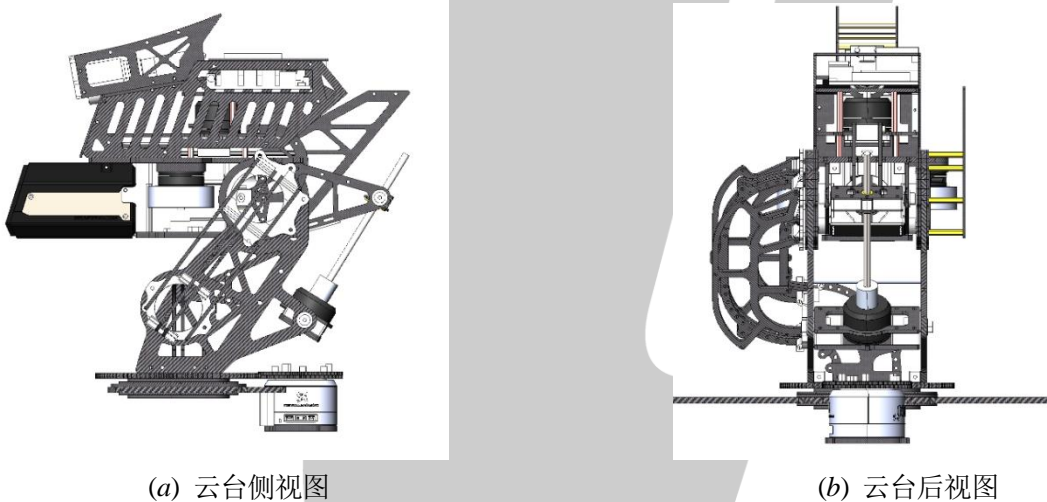


图 4-9 云台整体结构设计

yaw 轴采用齿轮传动，由于加工误差且齿轮传动纯在齿隙，导致不能精确控制，因此采用消回差机构，两层齿轮之间用拉簧拉开达到消除的目的。如图 4-10 Yaw 轴消隙计算图

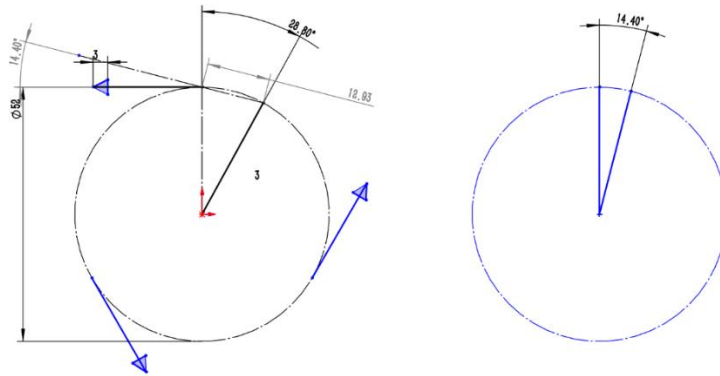


图 4-10 Yaw 轴消隙计算图

为确保在往复转动的响应，需要对拉簧进行校核，假设错开  $\theta$  进行消回差，拉簧劲度系数为  $k$ ，例 12.93mm 为拉簧伸长量  $\Delta l$ ，半径为  $r$ ，由于伸长而产生的力沿圆周向的分力  $F$ ，产生的力矩应与 yaw 轴电机 6020 的额定扭矩（1.2N\*m）相等，从而得出正确的拉簧选型。

$$3k * \Delta l * \cos \frac{\theta}{2} = \frac{1.2}{d}$$



图 4-11 Yaw 轴消回差设计图

### 4.1.2.3 拨弹机构设计

#### 1. 需求分析

在实际需求中，由于低重心设计需求，采用下供弹拨盘。下供弹拨盘需要足够的坚实耐用，且不卡弹。

## 2. 拨盘结构设计

供弹机构是下供弹英雄执行比赛功能的核心机构，为使机器人重心更靠近整体中心，我们采用的是中心供弹的方式，同时这样的供弹方式相较传统供弹底盘的布局更对称简洁。同时作为成底盘的结构件，使底盘的整合度更高。

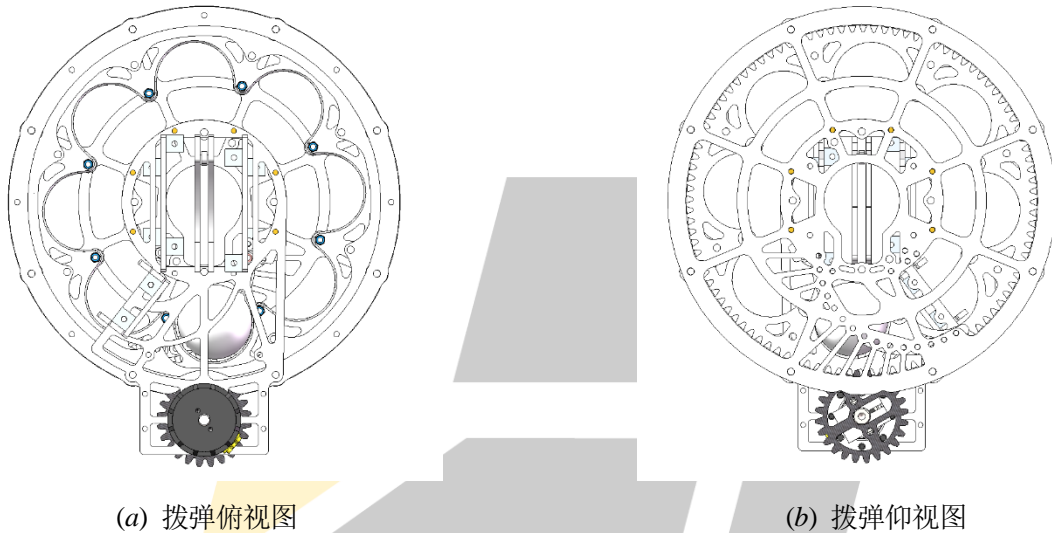


图 4-12 底盘结构设计

### 4.1.2.4 车架结构设计

#### 1. 需求分析

车架是英雄机器人底盘的主要构成部分，承担着承载云台以及其它机构和元器件的作用。车架主要包括底盘、主板、底盘梁、保险杠以及被救援机构等机构。

#### 2. 悬挂结构设计

车架是英雄机器人底盘的主要构成部分，承担着承载云台以及其它机构和元器件的作用。车架主要包括底盘 主板、底盘梁、保险杠以及被救援机构等机构。

车架采用薄壁铝方管进行设计，与板件间用螺丝铆钉等连接件，保证强度和刚度，成本低。利用装甲板支架和板材榫卯拼接，在做弹舱的同时起到支撑云台的作用，既提高刚度，结构也更加简洁，弹舱空间更大。铝管内切槽口进行拼插，使得铝框架整体更低且空间利用率更高，考虑到由于槽口的添加导致刚度不够的问题，将防撞铝管连接在一起增强整体刚度。

安装防卡导轮，防止飞坡姿态不稳时落地倒栽。如图 4-13 车架结构设计



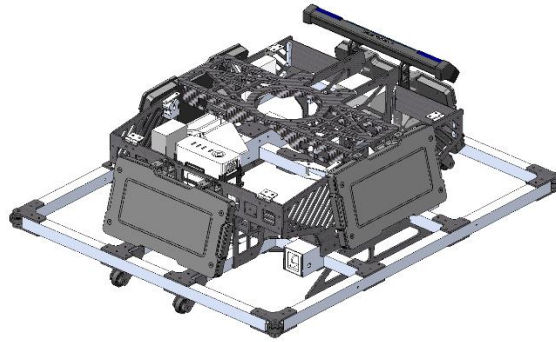


图 4-13 车架结构设计

#### 4.1.2.5 悬挂设计

采用滑轨滑块加转轴的自适应结构，采用拉簧减震，由于其不能受压，加装气缸用作限位，该构型可以将避震放到车身框架以下，为弹舱争取更多位置，且相比于传统转轴更适合于该底盘，更换不同劲度系数的拉簧可调节底盘避震性能，现为线径 2.5mm，直径 10mm，长度为 120mm 的拉簧。如图 4-14 悬挂结构设计。

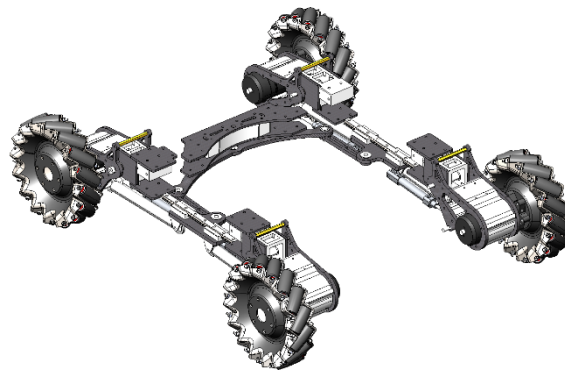


图 4-14 悬挂结构设计

#### 4.1.2.6 轮组设计

采用压片联轴器加止推轴承的单边轮组设计，相比双边节省更多空间，同时更换减速箱中深沟球为角接触轴承承担两侧的轴向力，用铜螺柱作为轮组的机械限位。用一根  $\Phi 6*60$  的塞打螺栓作为轴，同时在铝管内侧两边各嵌一块 3mm 黑色玻纤板防止打印件出现蠕变和铝管变形，实测无“外八”现象。如图 4-15 轮组结构设计。

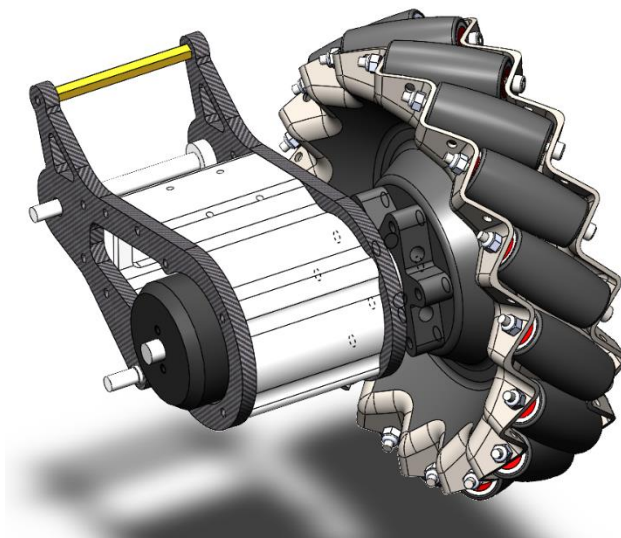


图 4-15 轮组结构设计

## 4.2 工艺选择

整体铝框架选择用锯铝机和钻铣一体机利用雕刻机加工的标尺与铝管配合进行手工加工，如 4-16 所示，加工精度基本可以达到要求，且迭代效率远高于雕刻机之间加工铝管。

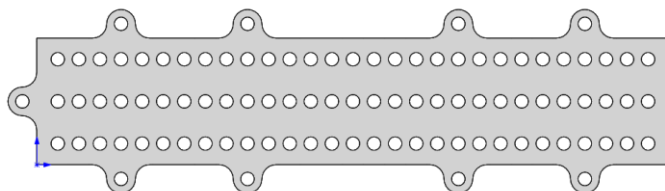


图 4-16 标尺图纸截图

大部分零件为板材，使用实验室配备的雕刻机加工，将 2D 图纸导为.dxf 格式，利用工位机中自带编刀软件——文泰雕刻 2002 与 SketchUp2015，将刀路生成.gcode 格式文件，如图 4-15 所示，用于加工玻纤板，加工周期短，易于迭代。

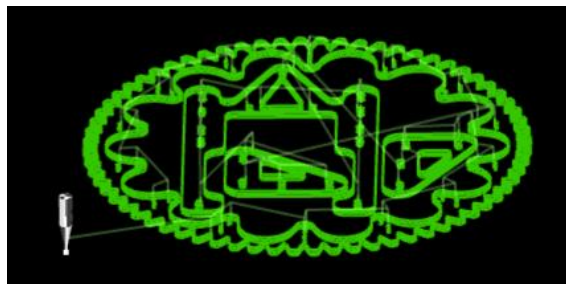


图 4-15 工控机中生成刀路截图



对于一些对强度和精度不需要很高要求，但是外形较为复杂，难以利用玻纤板拼接而成或利用玻纤板设计过于复杂的零件，使用 3D 打印机进行 PLA 或 ABS 的 3D 打印；对于一些对强度要求不高，但对精度要求较高的零件，将零件发至未来工厂进行光固化加工，轮组及拨弹盘打印件设计图如图 4-16 所示。

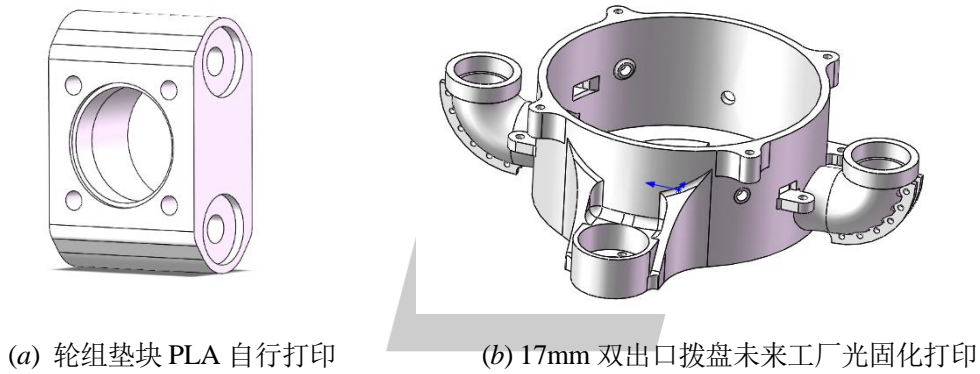


图 4-16 部分打印件零件截图

对于一些回转体零件，使用车床自行车削加工，如图 4-17 所示。

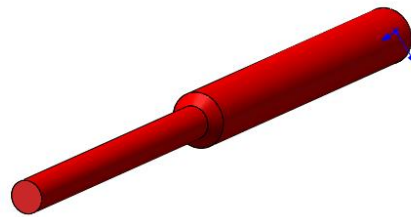


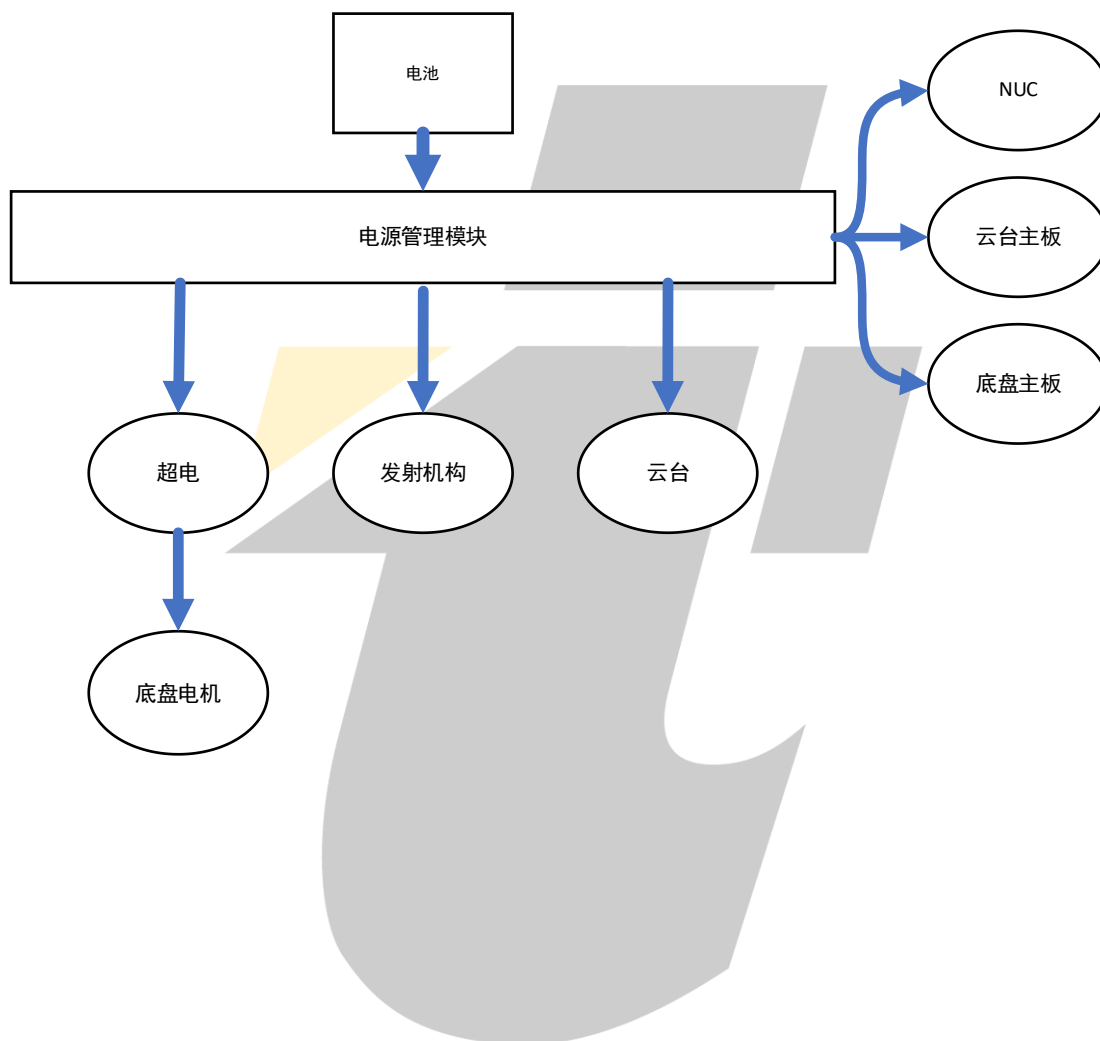
图 4-17 部分车削零件截图

对于一些强度较高、精度要求高、难以自行加工的，且标准件满足不了设计需求的零件，通过外包将零件发给外部加工厂加工。

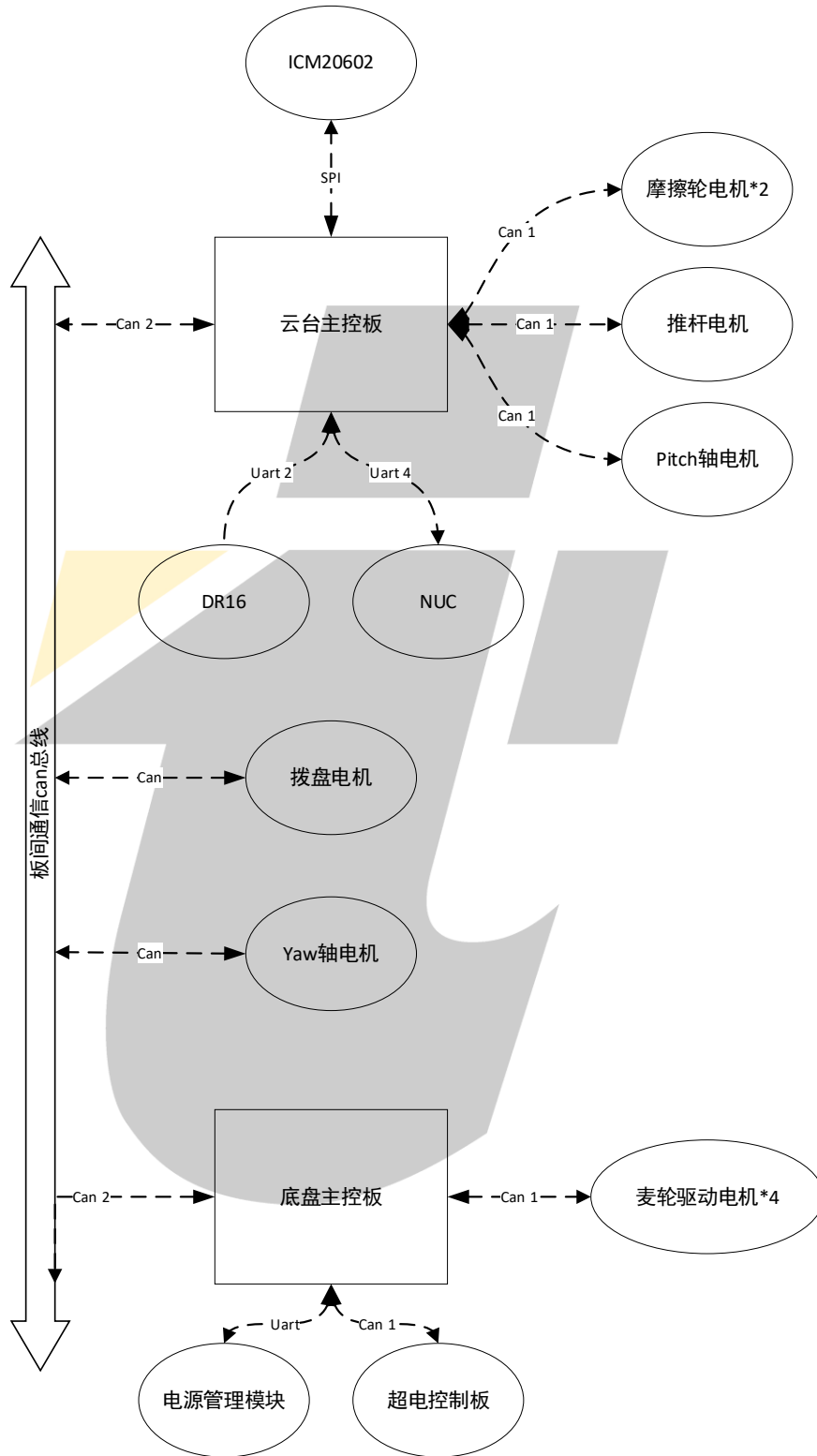
## 5 硬件设计

### 5.1 整机硬件方案框图

#### 5.1.1 电源走向



### 5.1.2 信号走向



## 5.2 硬件详细设计

### 5.2.1 主板

步兵机器人搭载的是 STM32F407VET6 芯片为核心的嵌入式主板。图 1.5.2-1 是自研主板的实物图，原理图见附录 1。

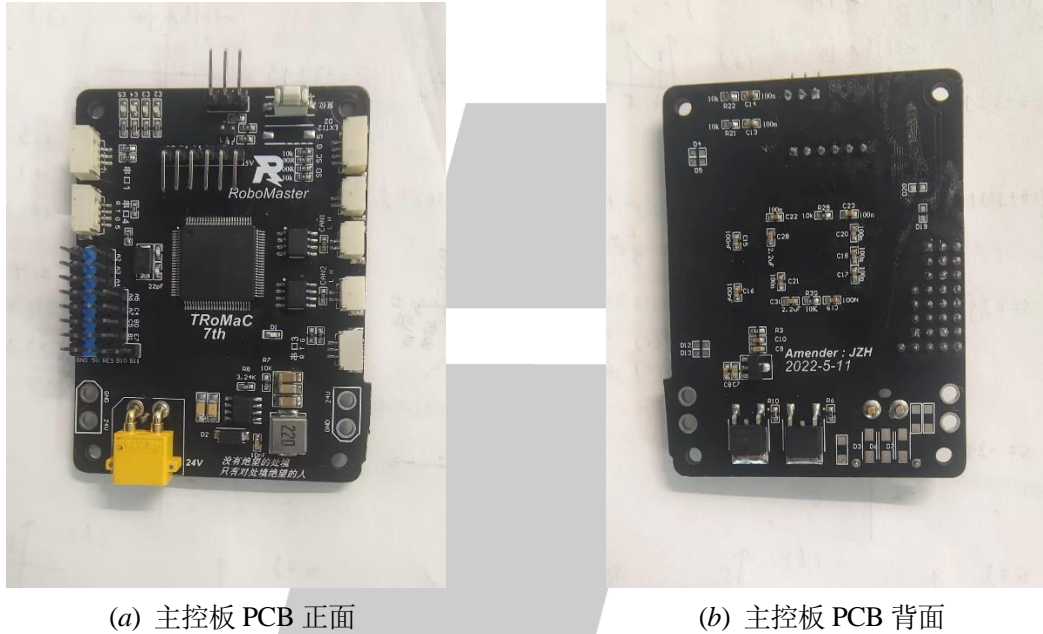
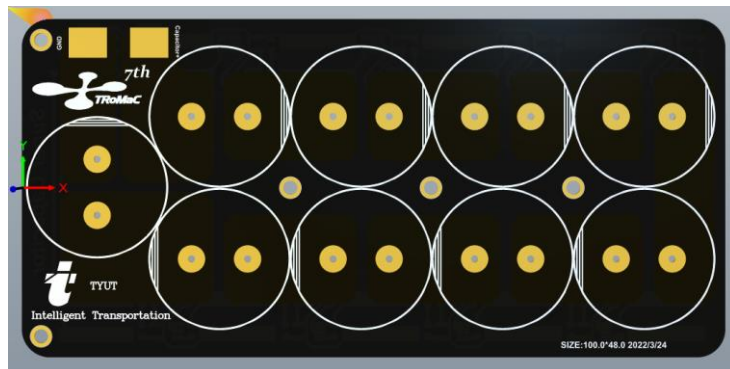


图 5-1 自研主控板概览图

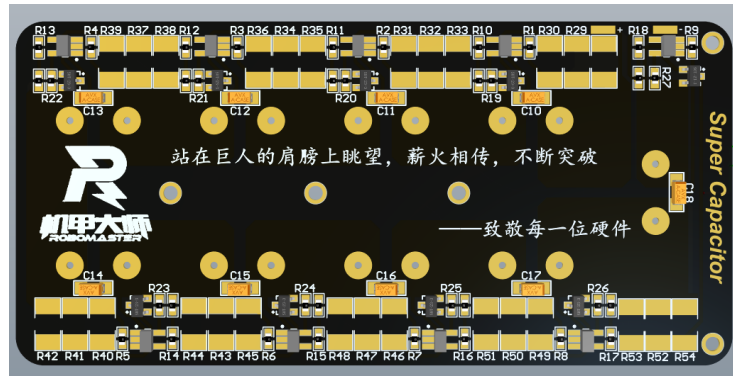
### 5.2.2 超电

超级电容组采用的是 2.7V,60F 的法拉电容组，九个电容进行串联，耐压值为 24.3V，总能量约为 1978.1415 焦耳。电路采用 BW6101 芯片构建的均压电路。

电容组 PCB 板如图 5-2:



(a) 电容组正面



(b) 电容组背面

图 5-2 超级电容控制板 PCB 图

超级电容控制板采用雾列模块的开源<sup>[5]</sup>，即单 BUCK 控制，基于雾列的基础上加上了一个高侧开关控制电源到底盘的通断，解决了电容组耗尽后底盘无法移动的问题。

在初步测试中发现切断电池供电时电源口依旧有电压，猜测是电容口电压倒灌所致，排查时发现是高侧开关的原因，于是在高侧开关后又加了一个整流二极管（型号为 SK1010）隔掉了电容向电源倒灌的电压，经测试解决了 PMOS 在没有达到导通条件时发生导通的现象，如图 5-3。

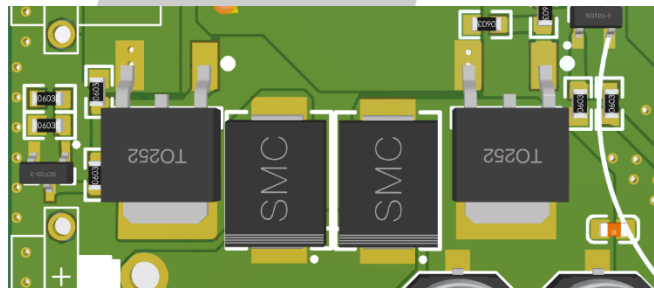
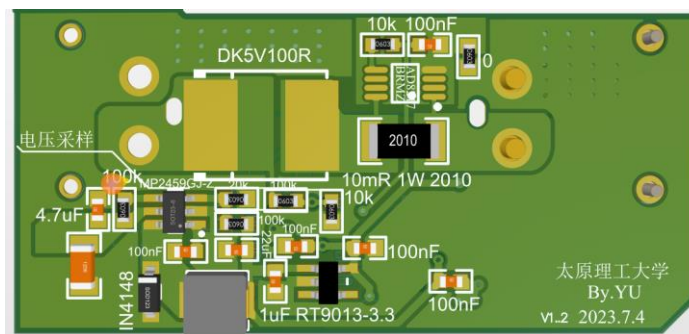
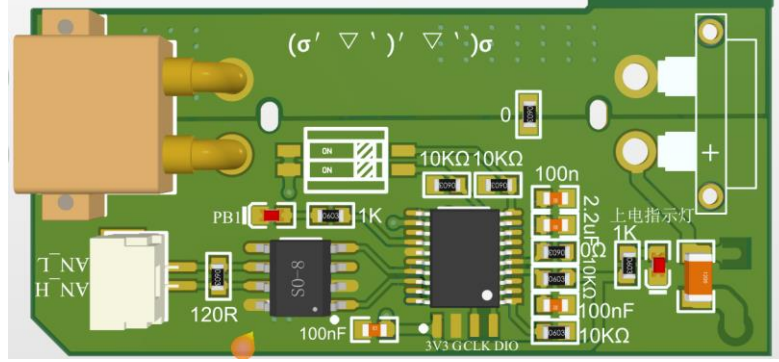


图 5-3 高侧开关图

利用 AD8217BRMZ 制作了一个简易电流计，如图 5-4，使用时串联在电源线中即可测得电流，使用时非常方便，但需要注意电流的方向。



(a) 背面



(b) 正面

图 5-4 简易电流计原理图

### 5.3 关键器件选型

#### 5.3.1 电源部分

如图 1.5.2-5 所示电源框图，主板使用的降压芯片采用 TPS5430 和 AMS1117-3.3 给外设接口和芯片供电。同时版上载有 1 颗 ICM20602 陀螺仪，CAN 通信芯片采用 TJA1051T。

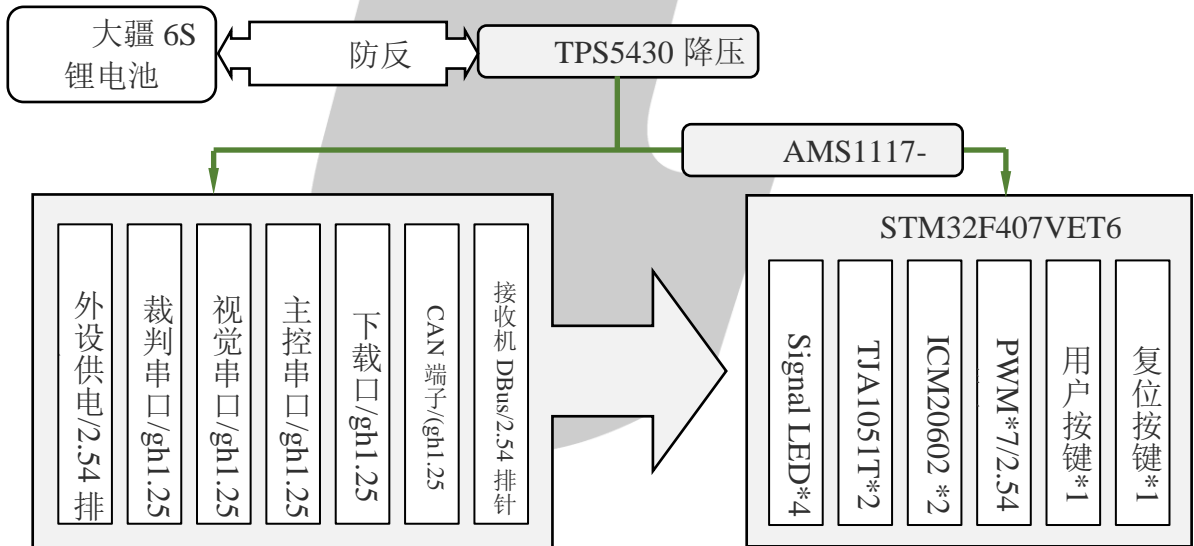


图 1.5.2-5 控制板电源框图

参考 RoboMaster 主控开发板设计，使用两个 PMOS 管构成的防反接电路，如图 5-6，可以保证上电时 TPS5430 正常工作。

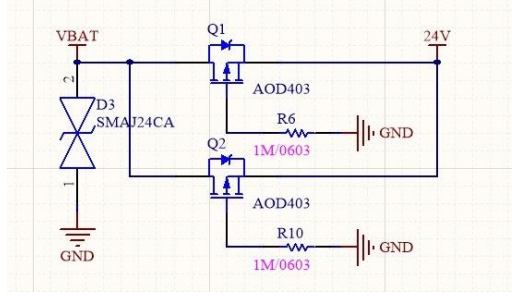
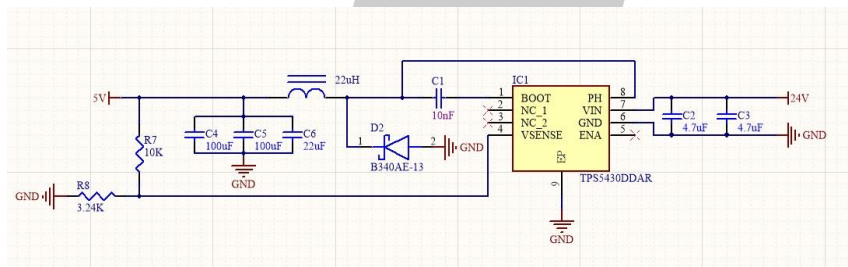
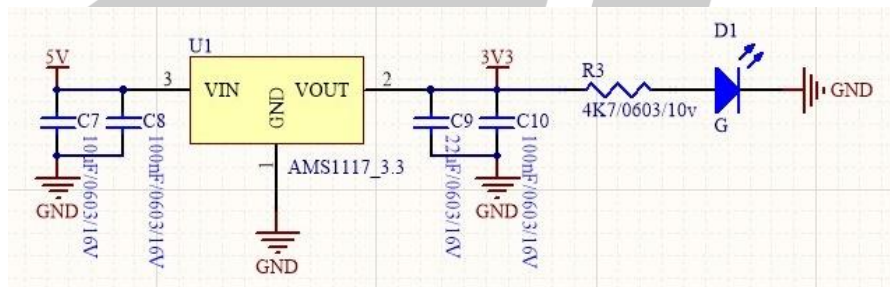


图 5-6 防反接电路原理图

降压电路，使用 TPS5430DDAR 和 AMS117-3.3 降压芯片，外加 LED 电源指示灯，如图 5-7 所示。



(a) 24V 降 5V DC\_DC



(b) 5V 降 3.3V LDO

图 5-7 降压电路原理图

2021 赛季中，战队自研主控板存在概率性上电就炸的现象，查明为防反接电路中的 TVS 管（型号为 SMAJ24CA）烧毁所致，究其原因推测有以下两点，第一为冬天气候干燥，静电现象频发，容易炸板，同时期也烧过不少机电电调；第二为上电时的瞬时电压和瞬时电流过大，导致 TVS 管烧毁。考虑到这点，发现核心电源部分只有在降压部分加上了滤波电容，而在电池到防反接的一路上并没有进行类似处理。于是迭代时加上了两个 470uF 和一个 104 电容，容值相差倍数级别的电容能将高频和低频的波段给滤掉。同时为了防止 TVS 管再次烧毁导致板子上不了电，保险起见又加上了两个 TVS 管，保护机制如图 5-8。



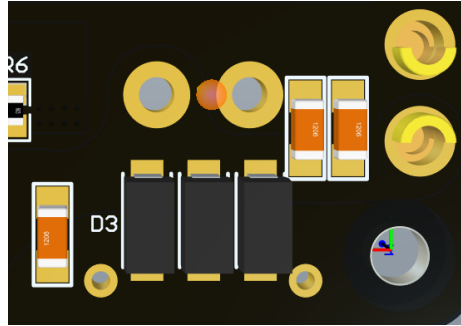


图 5-8 电源保护机制图

### 5.3.2 陀螺仪

上一赛季陀螺仪模块为板载陀螺仪，存在几个问题。第一，机器人的底盘主板并不需要陀螺仪，但是使用了统一的主控板，资源上有些浪费；第二，陀螺仪属于高精度传感器器件，由于队员焊接精度不足比拟工业机焊，尤其是这种高精度传感器器件，因此存在焊接成功率并不可观；第三，板载代表着陀螺仪和主控板固连，对于机械安装位置要求较高，而且参考 RoboMaster C 板的陀螺仪选择外接处理，因此决定从主控板中分离出陀螺仪模块，预留一个外设接口进行通信。这样的解耦结构便于维修和替换，且在 SPI 通信允许的线长之内均可使用，提高了维护和迭代效率。

战队最早采用的是 MPU6050，使用 IIC 通信，但是 IIC 通信对线的长度与质量要求很高，导致因为线路过长读不到陀螺仪的值，且 MPU6050 的零飘问题较为严重。此赛季采用 ICM20602，使用 SPI 通信，获取数据速度更快，姿态角度更新更具有实时性。对比下 ICM 系列的数据更加稳定，静止状况下零飘噪声比 MPU6050 更小。

### 5.3.3 调试接口

为了软件检修和调参方便，引出了芯片的几个端口用于 OLED 显示屏通信，OLED 模块采用的是太原理工大学晋豹智能车队研发的键显模块，同样是解耦结构，即插即用，方便调参与更换。

### 5.3.3 布线优化

基于云台旋转，为了方便性与效率考虑，所以对云台的布线进行了优化。其中最难处理的当属于滑环部分，其线多、细、材质较硬，更容易刮破皮层，遂采用航空接头进行处



理，第一是航空接头将滑环后半截的线替换成了硅胶线，增强了稳定性；第二是航空接头便于拆卸，无需再从分电板上将线头拔掉，省去了剪断扎带理线的繁杂过程，且航空接头上线序固定，不会出现插错的现象，如图 5-9。



(a) 实物图



(b) 样品图

图 5-9 轮组滑环航空接头

## 6 软件设计

英雄机器人搭载两块自研主控板，分别负责云台与底盘的控制，两块主控板之间通过 can 总线进行板间通信，交换裁判数据以及控制指令。整车结构图如图 6-1。

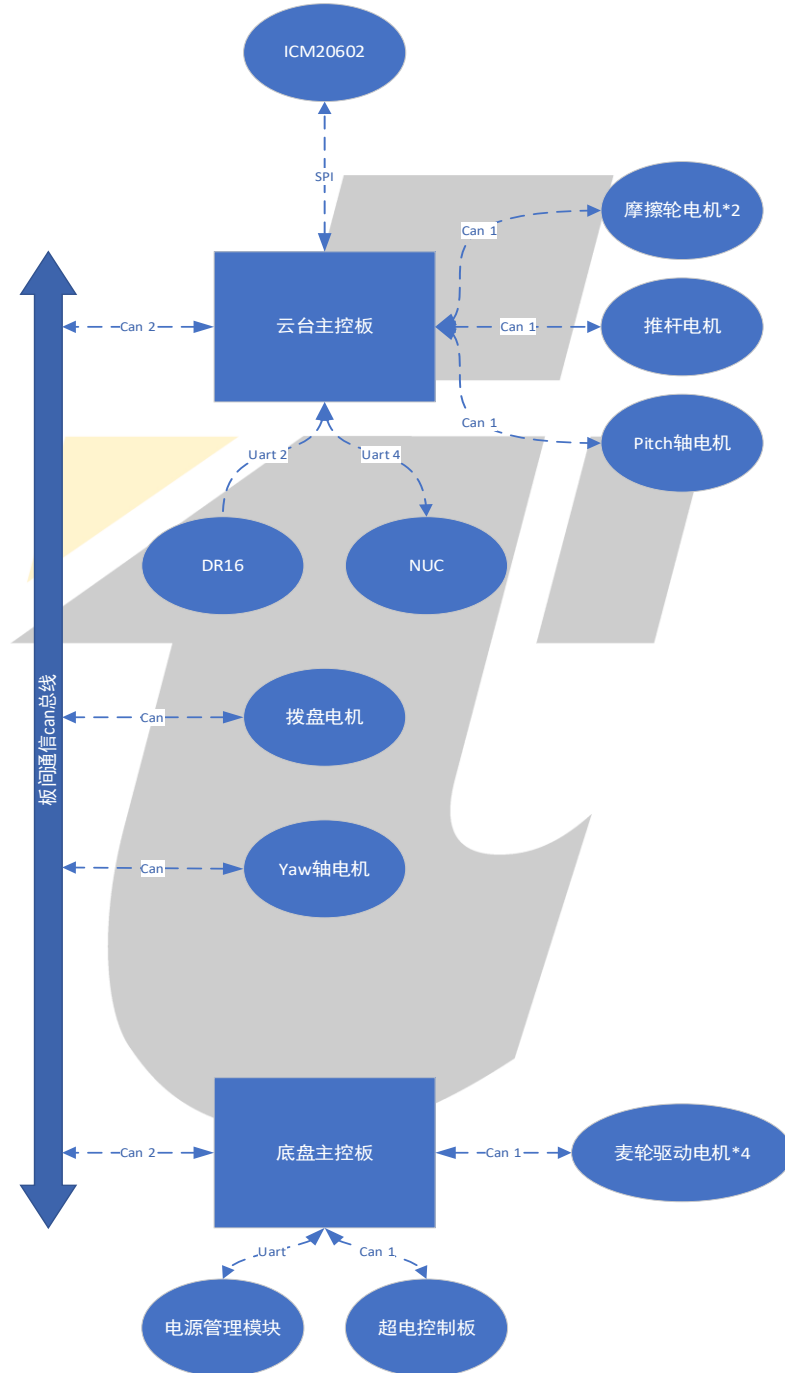


图 6-1 整车系统结构图

## 6.1 系统架构

如图 6-2 所示，机器人的系统架构可划分为驱动层、算法层、功能层、控制层。驱动层实现硬件驱动以及外设驱动，算法层包括基础算法库，通信层实现战车上使用的各种通信协议，以上四部分对所实现的功能进行封装并对外提供接口。功能层通过调用底层提供的接口实现各个业务逻辑，如发射逻辑、云台控制逻辑、底盘控制逻辑、超电控制逻辑等，此层将各个功能进行抽象，通过结构体对功能进行管理，并对外提供接口，实现了整车功能的解耦，降低了各个功能的移植难度。最高层为总体控制层，该层通过调用各个功能的接口实现整车的功能并负责与裁判系统进行通信。

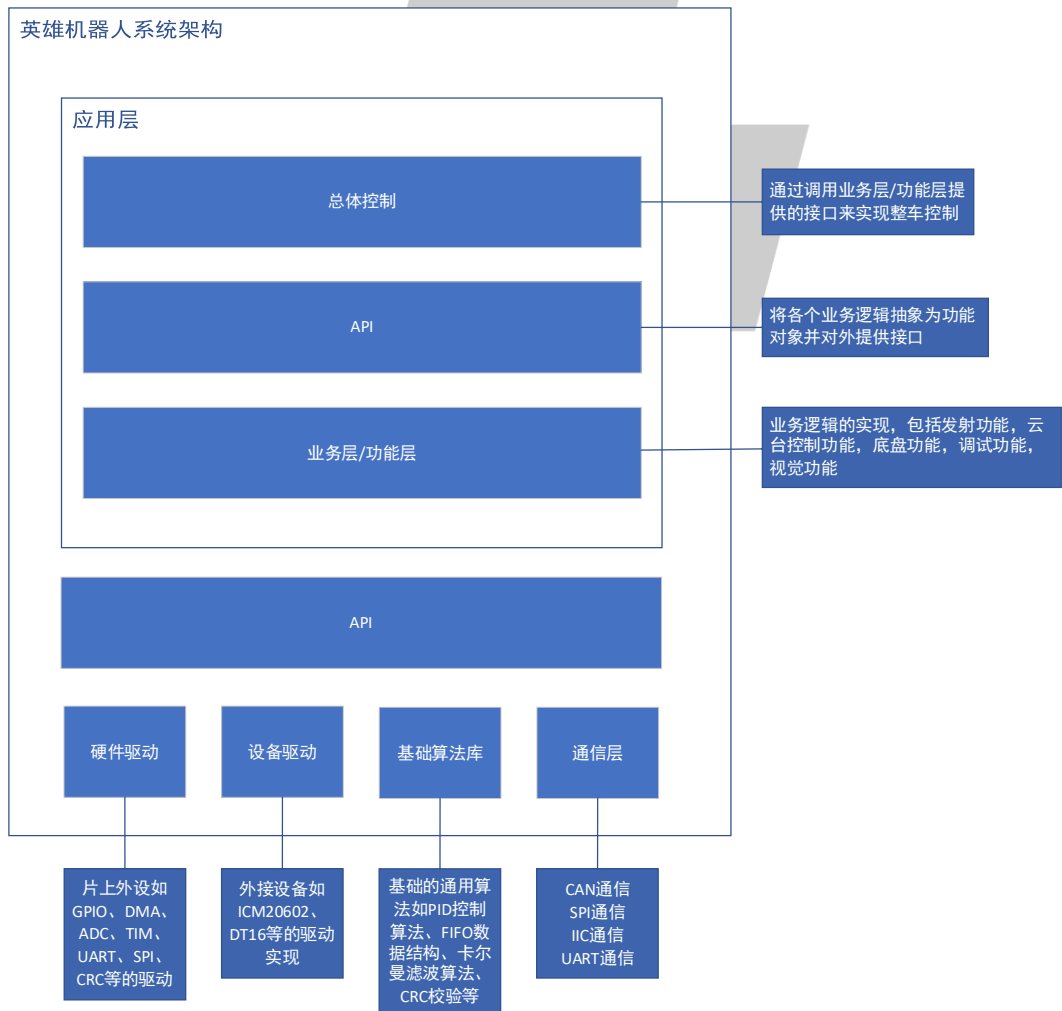


图 6-2 整车系统架构

## 6.2 第三方中间件

程序中采用的第三方中间件为 FreeRTOS，采用实时操作系统(RTOS)的原因为要确保动作与操作的实时性和方便代码模块化书写，而采用 FreeRTOS 除了免费之外更重要的是移植方便。

## 6.3 宿主机环境

宿主机环境配置如表 6-1。

表 6-1 宿主机环境配置表

环境	版本
Windows	10
IDE:MDK-ARM	V5.38.0
STM32F4xx_DFP Packs	V2.15.0
C Compiler	Armcc V5.06 update 7
STM32CubeMx	V6.7.0
package	STM32Cube FW_F4 V1.27.1
FreeRTOS	V10.3.1
CMSIS-RTOS	V1.02

## 6.4 调试环境

调试环境配置如表 6-2。

表 6-2 调试环境配置表

调试软件	版本
Keil MDK debug	V5.38.0
VOFA+	V1.3.10
野火多功能调试助手	V1.0.2.6

## 6.5 运行流程

由于英雄机器人搭载两块主控板分别负责云台与底盘的控制，故战车软件部分划分为云台程序与底盘程序，接下来将分别介绍云台程序及底盘程序。

### 6.5.1 云台程序运行流程

云台程序总体可以分为两个阶段，分别为校准阶段与控制阶段。

主控板上电之后首先进入校准阶段，在该阶段内将首先进行硬件以及外设的初始化，待底层初始化结束后执行云台的回中、发射机构的校零、底盘角度的初始化等任务，在此之后进入控制阶段。

云台程序的控制阶段可以划分为发射控制、云台控制以及底盘控制三部分。

1. 发射部分的控制逻辑如图 6-3 所示。

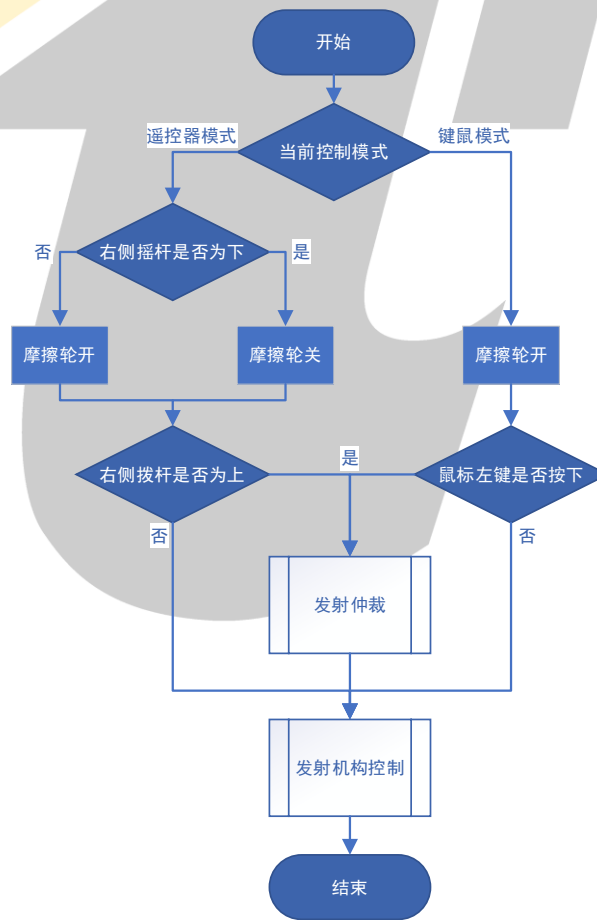


图 6-3 发射部分控制逻辑

发射仲裁部分将根据当前发射机构的状态、发射流程的执行情况、枪口热量等因素决定是否开始发射流程，进入发射流程后将由发射机构控制部分完成整个发射流程的管理。

2. 云台部分的控制逻辑如图 6-4 所示。

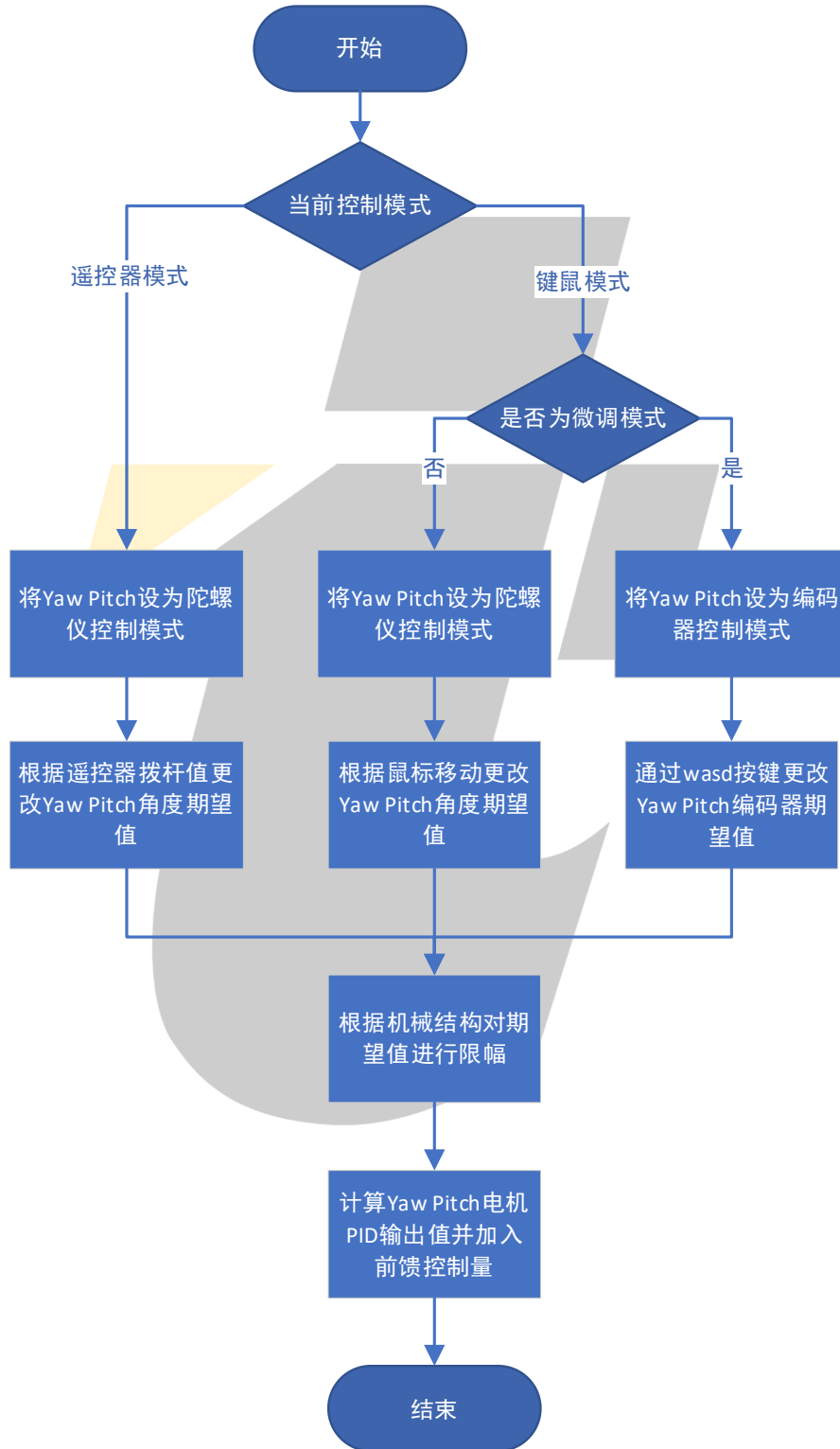


图 6-4 云台部分控制逻辑

3. 底盘控制部分如图 6-5 所示。

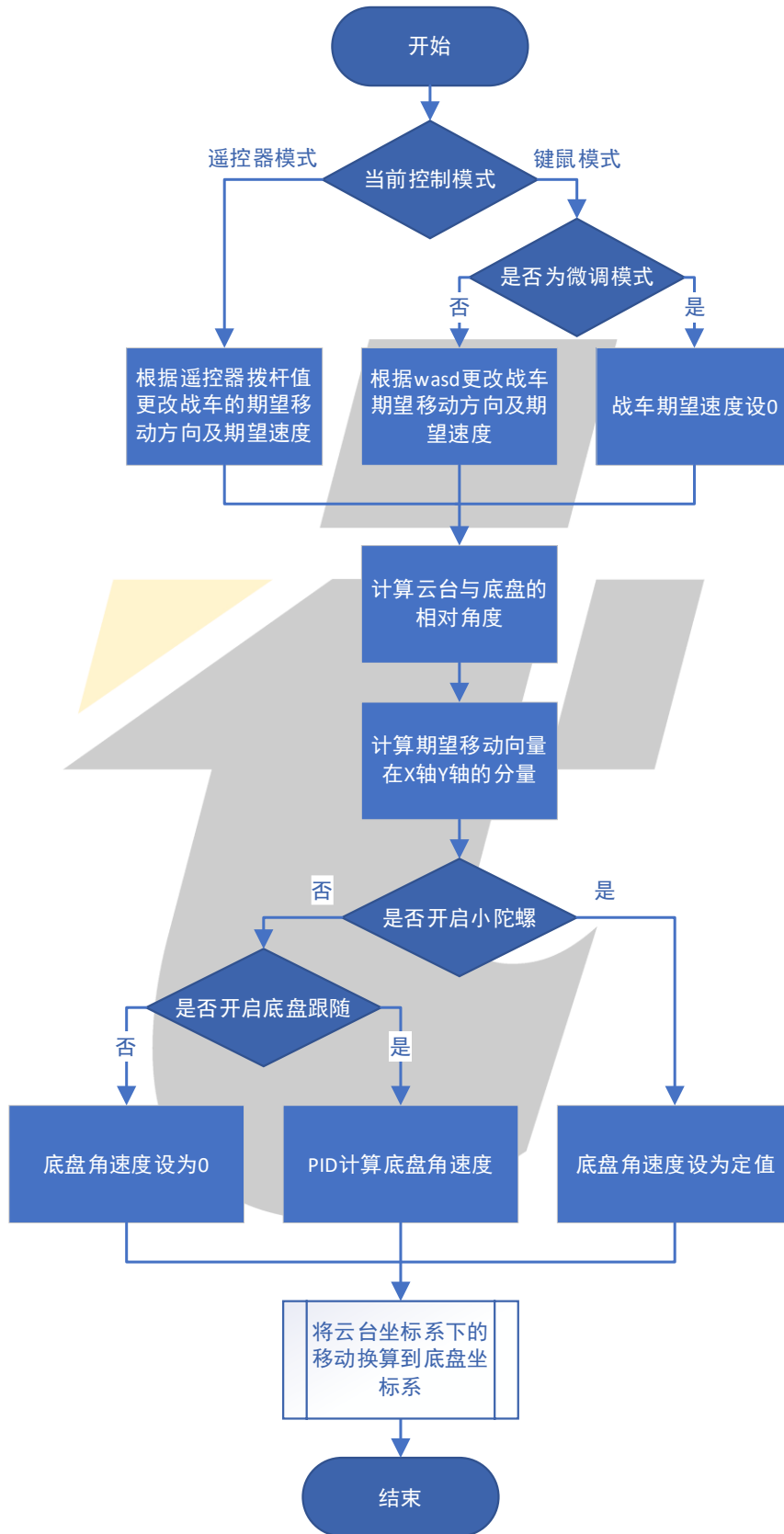


图 6-5 底盘部分控制逻辑

## 6.5.2 底盘程序运行流程

底盘程序的功能有接收云台发来的移动控制指令并根据指令控制四个麦轮电机、实现对底盘功率的控制、与电管进行串口通信获取战场信息以及战车状态信息、UI 界面的绘制。向云台板发送精简后的裁判系统内容。

### 6.5.2.1 重点功能

#### 1. 发射机构控制

本赛季英雄机器人的发射机构采用下供弹+推杆的方案，此方案从根本上解决了错误连发的问题，相对于上赛季的二级拨弹方案稳定性更好。推杆的前推过程中若使用单位置环控制则无法做到匀速前推，若使用双环控制则存在末段速度不稳定的情况。最终选择使用前推时单速度环控制，回退时双环控制的方式来实现推杆控制逻辑。

#### 2. Pitch 轴控制算法

本赛季的 Pitch 轴使用丝杆驱动方式，可以实现精准的定位效果，天然克服弹丸发射时的后坐力。在控制方面采用双环串级+前馈控制的方式，加快 Pitch 轴响应速度。前馈量是通过查表法给出。将 Pitch 轴的有效角度等分为十个区间，在每个区间内分别测量出抬升与下降对应的输出值并将其记录在一二维数组中。此外还通过对电机编码器值的闭环实现了微调模式，该模式可以让操作手在瞄准时进行更细致的控制。

#### 3. 超级电容恒功率控制

本赛季的超电控制板是队伍自己研发，在控制板的程序中，控制逻辑是较为重要的一部分。通过对电压电流值的采样，底盘板传入指令进行判断，在电压环和电流环中选择后进行增量式 PID 计算。流程图如图 6-6 所示。



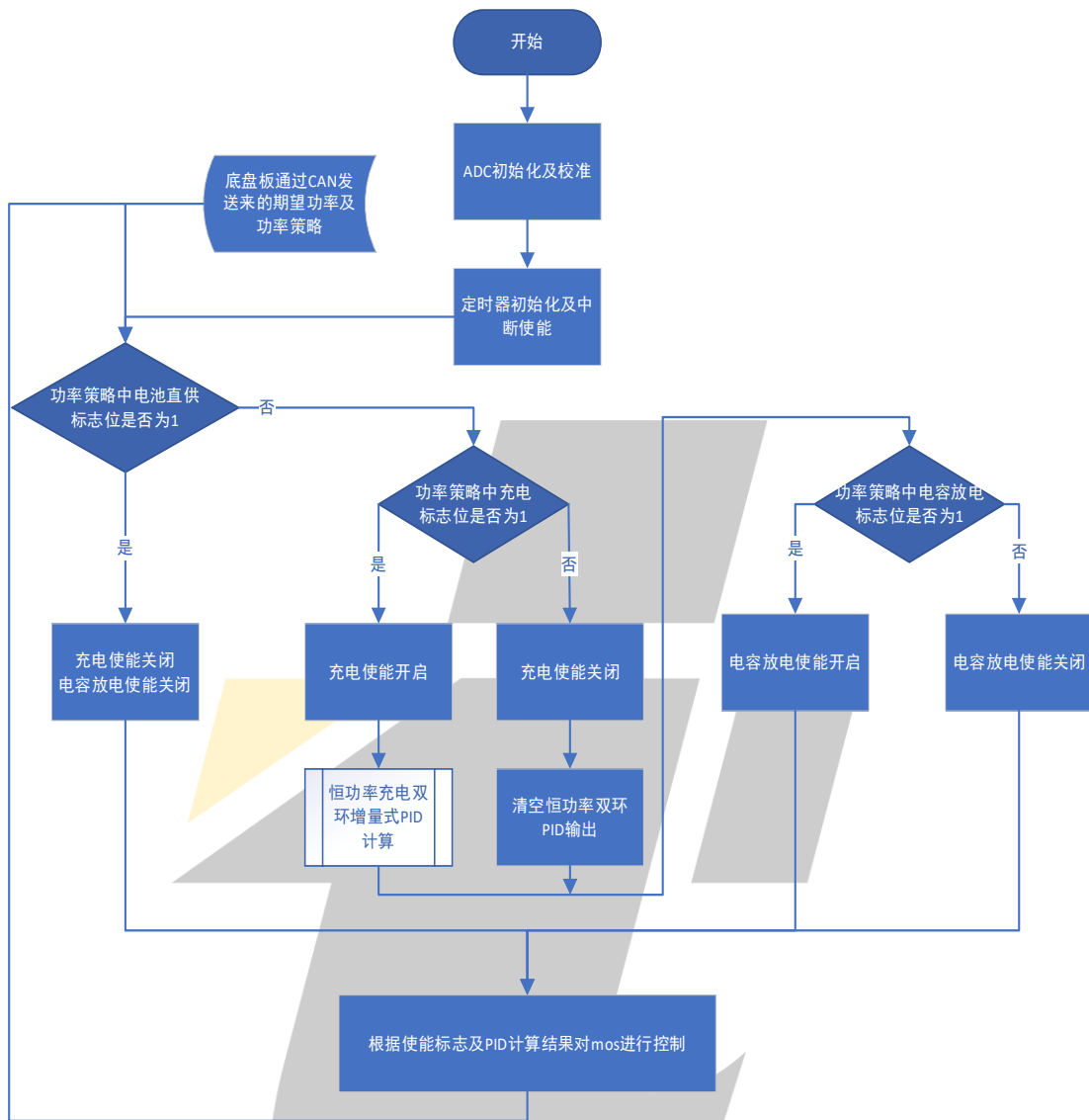


图 6-6 超级电容控制程序流程图

### 6.5.2.2 软件测试

#### 1. 软件调试工具

在软件调试过程中我们主要使用开发环境自带 debug、串口工具、官方裁判系统、自编调试代码和软件等调试手段。使用 Keil MDK 自带的 debug，借助调试器检查代码进程、变量数值是否正确。使用串口调试工具可以传回实时数据和打印波形图，通过在主控代码中添加相应的串口重定向库，把想观测的数值打印为波形，并且编写了可适用于 HAL 库的函数库，满足队伍的调试需求。串口助手实例如图 6-6。

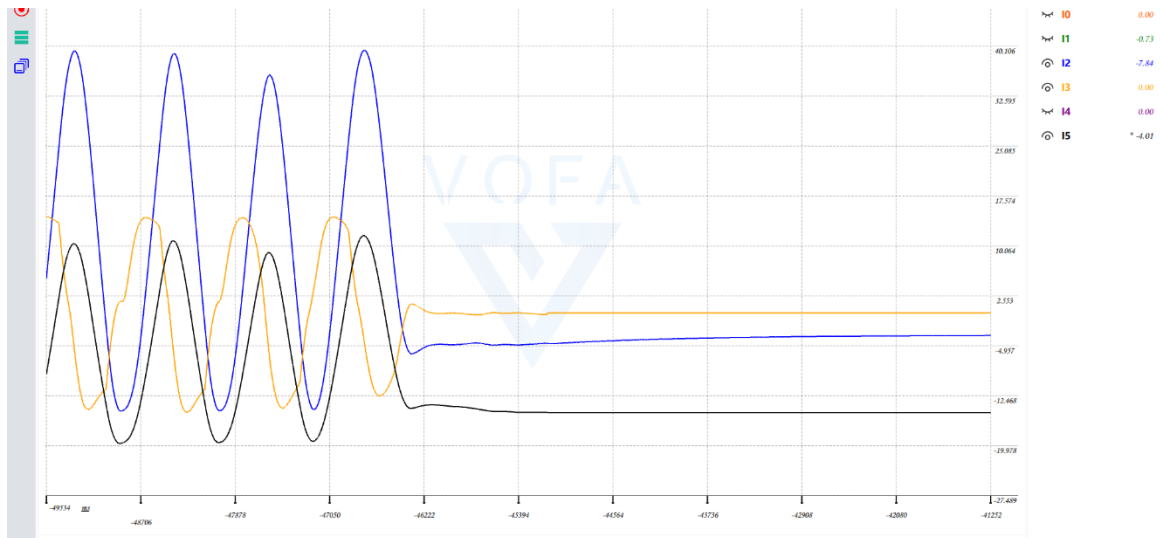


图 6-6 用串口助手调试

## 2. 嵌入式软件测试流程

- 1) 平台测试：这部分包括硬件电路测试、操作系统（FreeRTOS）及底层驱动程序测试（基础配置）等。这一部分我们会考虑硬件的整体性能（耐压，是否出现发热，能否满足赛场快节奏，高压力的对抗条件），各个功能是否可用（如主控板的程序下载，通信功能，IO 口是否正常），对操作系统 FreeRTOS 上我们会测试任务是否正常调度，任务之间是否存在逻辑冲突，操作系统的响应速度等。对底层驱动程序测试（基础配置）我们会考虑相应功能是否正常，通信端口能否正常收发以及其数据传输率等。简单来说就是所有的底层能否正常运行；
- 2) 模块测试：这个部分我们一般是对一些自制的或购买的成品模块进行代码测试，由软件对其进行编码。编码完成后，把各个模块集成起来前，必须对单个模块进行测试。此阶段主要是进行白盒测试，我们会对电机，传感器模块进行相应的测试，测试其正常的功能，对代码进行最精简化，但同时要保证真正实现所有功能，实现相应操作；
- 3) 集成测试：单个软件模块测试正确之后，将所有模块集成起来进行测试。主要是找出各模块之间数据传递和系统组成后的逻辑结构的错误；
- 4) 系统测试：集成测试完成后，退出宿主机测试环境，把系统移植到目标机上来，完成应用到现场环境中的移植，从用户的角度对系统进行黑盒测试，这个阶段简单来

说就是把车给操作手进行各种训练，出现问题后，软件记录并解决，再交给操作手训练，从操作手处得到反馈，进行性能优化。

### 3. 执行情况与结果

在平时的训练中所有在机器人上运行的硬件平台都为经过测试后可以承担相应功能的模块如：电机电调模块、CAN 通讯模块、ICM20602 陀螺仪模块。确保集成测试时机器人所展现的问题只有程序上的错误，而非硬件本身的问题。

在集成测试无问题后，全部移植到机器人上，进行实地的训练，针对用户（操作手）提出的问题 and 训练时出现的问题进行记录 and 解决。表 6-3 为部分测试结果。

表 6-3 部分测试结果记录

问题描述	问题出现原因	问题解决方案	实际解决效果
推杆每次前推的位置不同	3508 电机每次上电后的编码器值不同	每次上电重新执行找零操作	每次前推程度相同
推杆前推速度不均匀	串级控制下末段速度期望减小	改用单速度环控制加判断的方式实现指定位置的前推	实现匀速前推
云台出现高频抖动	PID 调节出现问题，或者 Yaw 轴齿轮错位	重新固定 Yaw 轴齿轮	解决问题
偶尔出现超热量	一次打出了两法或连续两次发射	检查发射逻辑	多次测试未能复现
小陀螺移动时不流畅	运动学解算有些参数出现问题或功率限制导致 XY 方向输出不均衡	修改功率限制部分逻辑，使 XY 功率分配更均衡	基本解决不流畅的问题，但是移动速度慢
一键掉头底盘旋转 180° 而头不动	云台 Yaw 轴期望没有改变	修改控制代码	底盘不会再出现旋转 180° 的情况

表 6-3 部分测试结果记录续表

问题描述	问题出现原因	问题解决方案	实际解决效果
一键掉头从后到前可以正常，但从前到后会有概率导致底盘旋转 360°	一键掉头对底盘跟随的期望值更改有误	对期望值的更改由原本的每次增加 180° 更改为一次增一次减	解决问题
推杆电机在比赛开始后推的位置发生改变	比赛开始时会给发射系统断一次电，导致 3508 的编码器值发生改变，且此改变不固定	为操作手增加重新校准按键	解决问题
发射机构校准过程中会出现枪管中卡一颗或半颗弹丸的情况	发射机构断电时可能正在执行发射流程或战车在移动过程中的颠簸将弹丸甩到枪管内	修改校准逻辑，允许校准时枪管内存在弹丸，并对两种情况做特殊处理	解决问题

## 7 算法设计

### 7.1 搭载平台

算法设备使用雷神 MIX-miniPC 作为运算平台，使用工业相机、8mm 定焦镜头，调试软件使用 Ubuntu22.04, Visual Studio Code, OpenCV 4.6.0、Ceres Solver 1.14.0。

各项参数如表 7-1、表 7-2 所示。

表 7-1 算法平台配置硬件参数信息

硬件	型号	主要参数
运算平台	雷神 MIX-miniPC	i5-13500H
工业相机	大恒图像 MER-139-210U3C 工业相机	1280*1024
镜头	\	8mm 定焦

表 7-2 算法平台配置软件配置信息

软件	版本
OS	Ubuntu 22.04
IDE	Visual Studio Code
Library	OpenCV 4.6.0, Ceres Solver 1.14.0

## 7.2 主要功能

装甲板的识别与跟踪，主要流程图如图 7-1 所示。

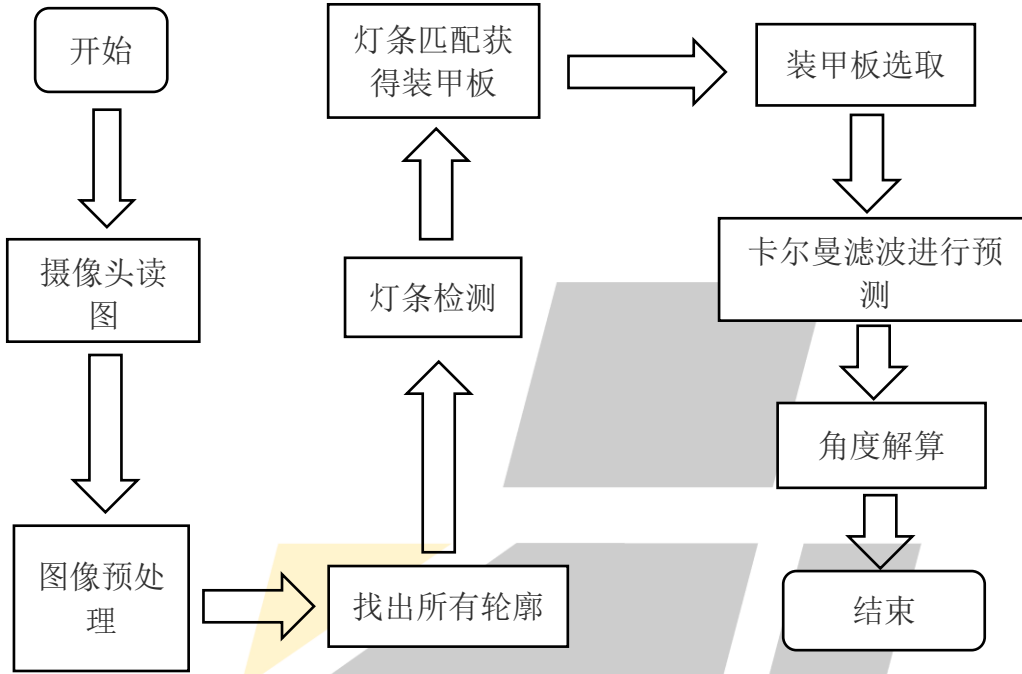


图 7-1 图像处理流程图

### 1. 预处理

通过分离 RGB 通道，进行通道相减，获得通道相减图；  
直接将原图转为灰度图，获得灰度图。

将这两张图片分别二值化后，再进行闭操作，获得最终的二值化图像。如图 7-2 所示。

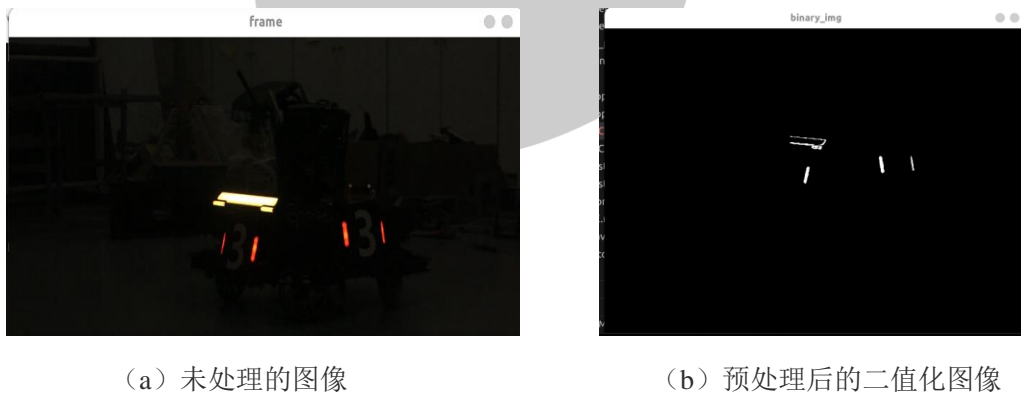


图 7-2 图像预处理示意图

预处理代码如下：

```
split(rgb_img, imgchannels); //进行通道分离
cv::cvtColor(rgb_img, gray_img, cv::COLOR_RGB2GRAY); //转为灰
度图
if(detect_color == 0) //如果需要识别的颜色为红色
{
    split_img = imgchannels.at(2) - imgchannels.at(0);
    cv::threshold(split_img, color_bin, min_split_red, 255,
cv::THRESH_BINARY); //90 min_split_red
    cv::threshold(gray_img, gray_bin, min_gray_red, 255,
cv::THRESH_BINARY); //30 min_gray_red
}
if(detect_color == 1) //如果需要识别的颜色为蓝色
{
    split_img = imgchannels.at(0) - imgchannels.at(2);
    cv::threshold(split_img, color_bin, min_split_blue, 255,
cv::THRESH_BINARY); //30 min_split_blue
    cv::threshold(gray_img, gray_bin, min_gray_blue, 255,
cv::THRESH_BINARY); //50 min_gray_blue
}
binary_img = gray_bin & color_bin; //进行闭操作
```

## 2. 灯条检测

通过 `cv::findContours` 找到所有轮廓，使用旋转矩形进行拟合，获得长宽比合理，角度合理的轮廓，将这些轮廓放入灯条容器当中。

## 3. 灯条匹配获得装甲板

对每两个灯条容器中的灯条进行匹配，通过计算两个灯条的角度差，中心距离等，获得对应的装甲板，同时将这些装甲板放入装甲板容器当中并进行标号。

## 4. 装甲板选取

将画面中的每一块装甲板的四个角点输入 `cv::solvePnP` 当中，计算出每个装甲板距离相机中心的距离，选取距离最小的一块装甲板。如图 7-3 所示，图中十字连接的图形即为选取的装甲板。





图 7-3 装甲板选取示意图

## 5. 运动预测

将选取的装甲板在相机坐标系下的坐标转化为世界坐标系，将这个坐标放入卡尔曼滤波器中进行运动预测。

预测过程：

$$\hat{x}_k = A\hat{x}_{k-1} + Bu_k$$

$$P_k = AP_{k-1}A^T + Q$$

更新过程：

$$G_k = P_k H^T (H P_k H^T + R)^{-1}$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k + G_k (z_k - H\hat{x}_k)$$

$$P_k = (1 - G_k H) P_k$$

将[坐标，时间]作为输入量，预测的坐标作为输出。

## 6. 角度解算

将上述预测坐标值进行角度解算，获得云台需要补偿的 Pitch 与 Yaw 角度，发送给下位机进行装甲板击打。

角度解算代码如下：

```
/**
 * @brief 计算需要补偿的 Yaw 角度
 *
 * @param 世界坐标系下 xyz 坐标
 * @return double Yaw 角度
 */
double CoordSolver::calcYaw(Eigen::Vector3d& xyz)
{
    return atan2(xyz[0], xyz[2]) * 180 / CV_PI;
}
```

```
/**
 * @brief 计算要补偿的 Pitch 角度
 *
 * @param 世界坐标系下 xyz 坐标
 * @return double Pitch 角度
 */
double CoordSolver::calcPitch(Eigen::Vector3d& xyz)
{
    return -(atan2(xyz[1], sqrt(xyz[0] * xyz[0] + xyz[2] *
xyz[2])) * 180 / CV_PI);
}
```

### 7.3 总结

算法优点：算法延迟低，可以在算力较低的平台得到较为优秀的效果；识别的精度高；程序编写简单；鲁棒性强；击打静止的装甲板达到 99% 的命中率，击打平移的装甲板有 80% 的命中率。

算法缺点：对复杂运动的物体击打命中率并不高。

未来发展：对敌方机器人进行整车建模观测，精准预测下一时刻敌人出现的位置。

## 8 研发迭代过程

### 8.1 测试记录

#### 1. 推杆速度对弹速影响

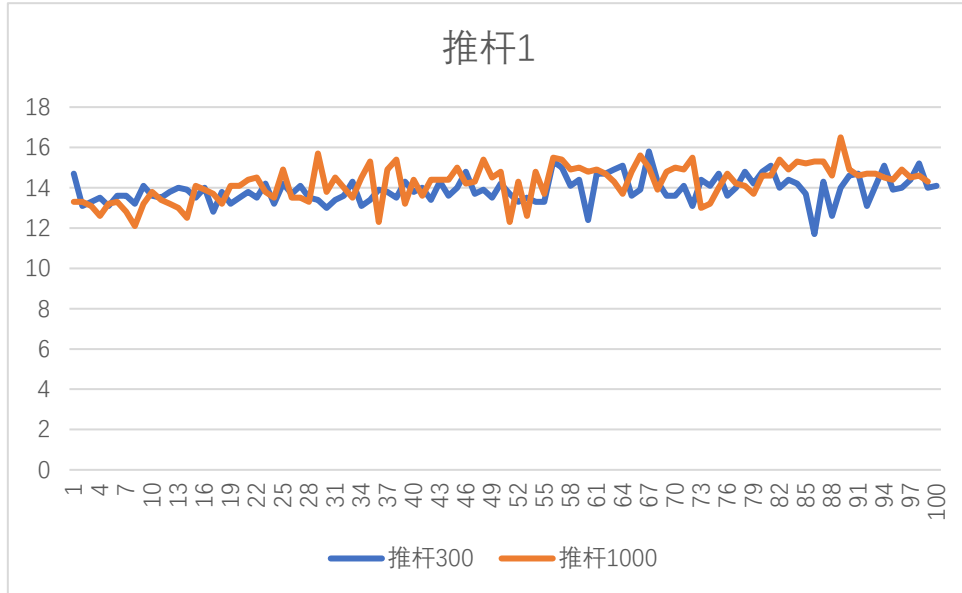


图 8-1 推杆速度对弹速影响图 a

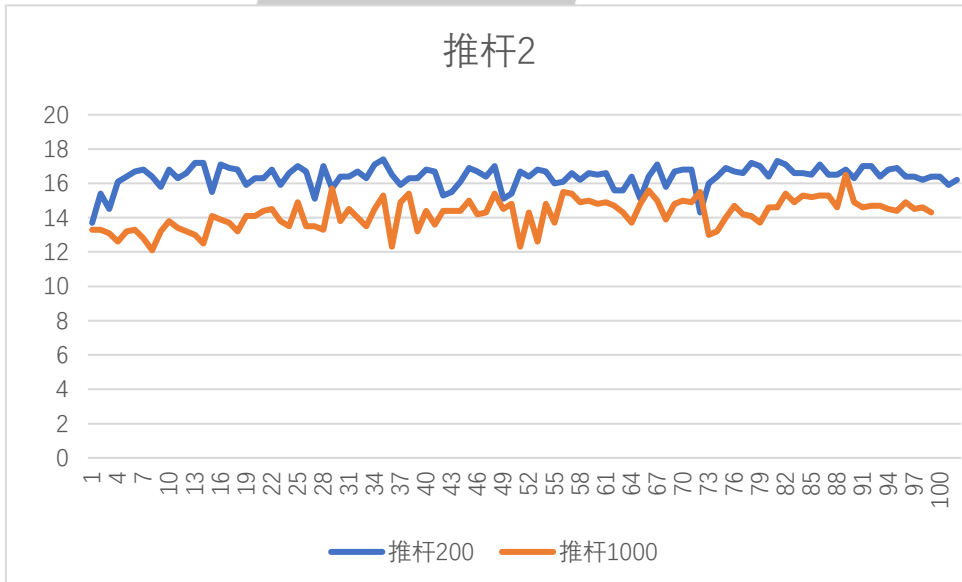


图 8-2 推杆速度对弹速影响图 b

实测发现，推杆速度越慢，弹速相对越稳定。

## 2. 推杆位置对弹速影响

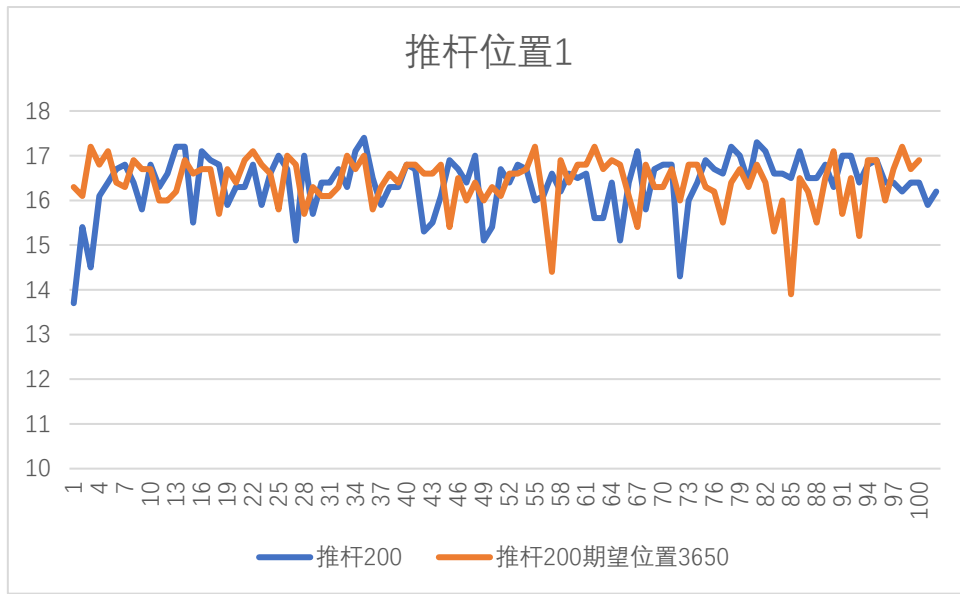


图 8-3 推杆位置对弹速影响图 a

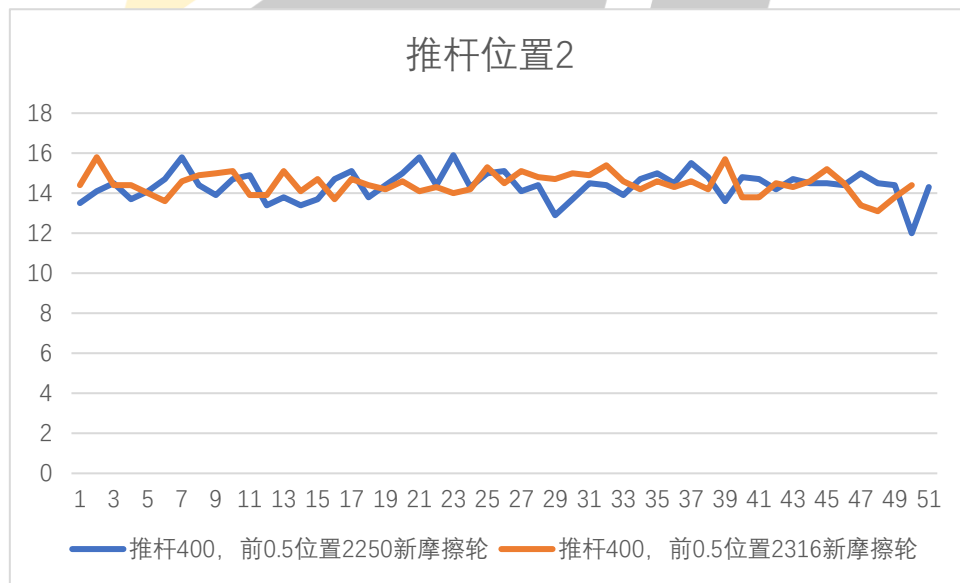


图 8-4 推杆位置对弹速影响图 b

实测发现，推杆位置的改变，对于弹速来说没有明显的变化。

### 3. 配重对弹速影响

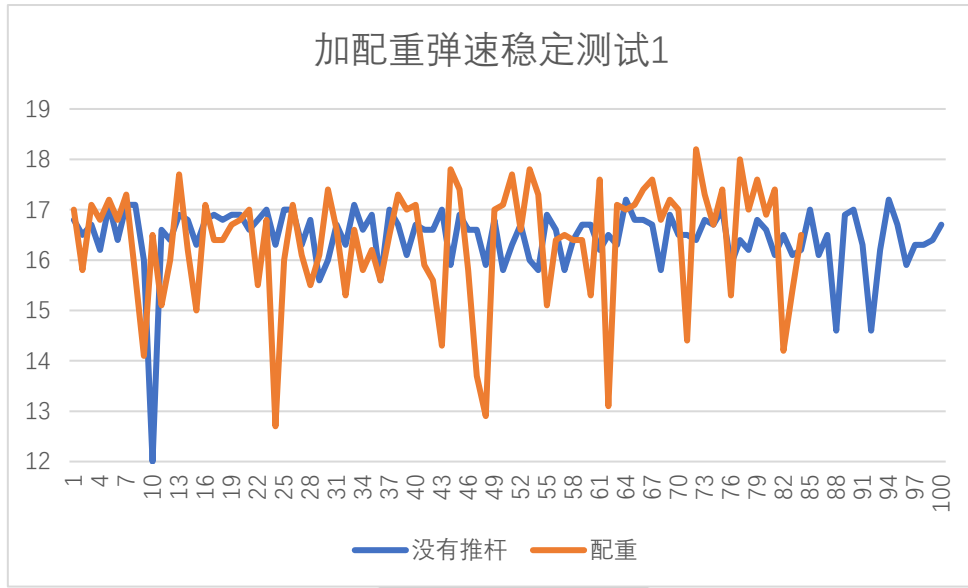


图 8-5 配重对弹速影响图 a

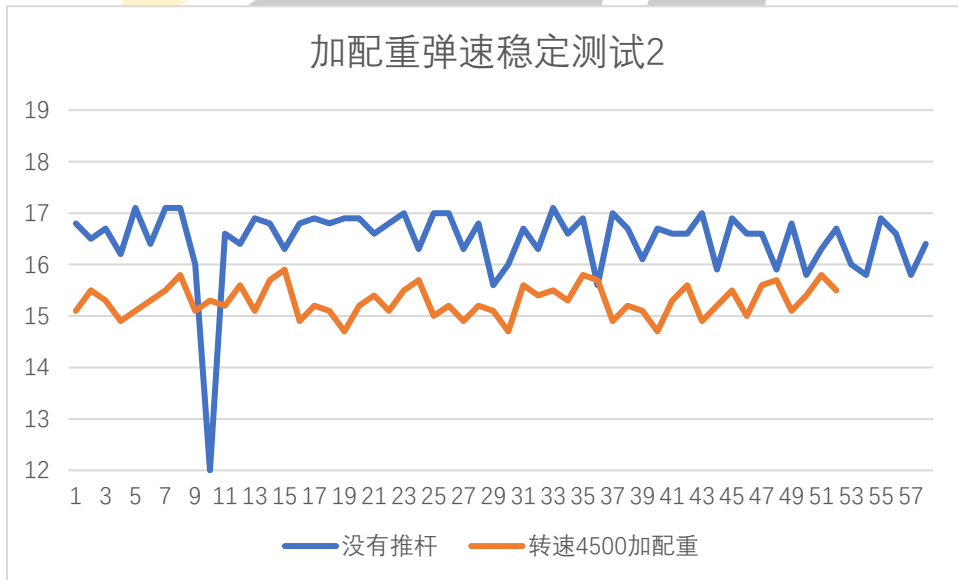


图 8-6 推杆位置对弹速影响图 b

实测发现，在配重情况下低转速的摩擦轮比不带配重快转速的摩擦轮弹速更稳定，但是低转速的不带配重摩擦轮无法达到所需速度，速度仅为 11m/s。

测试条件为室温 18 度，摩擦轮硬度 50，包胶厚度 6mm，直径 600mm，压缩量 4.5mm。

### 4. 压缩量对弹速影响

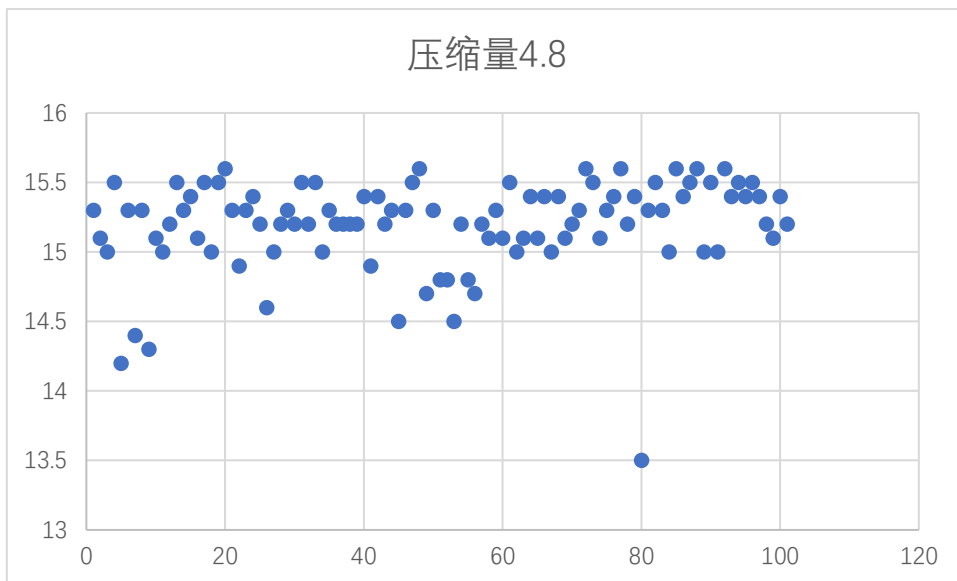


图 8-7 压缩量对弹速影响图 a

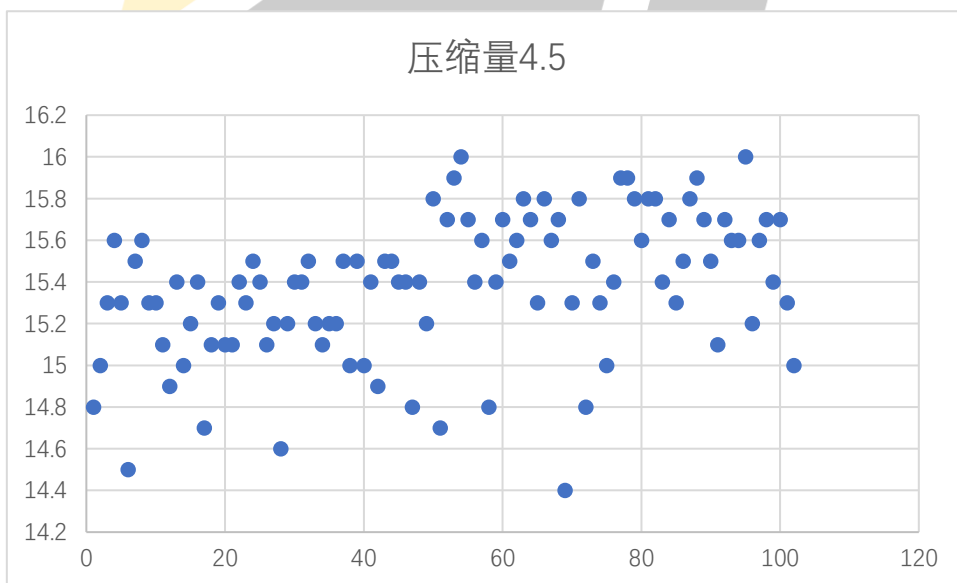


图 8-8 压缩量对弹速影响图 b

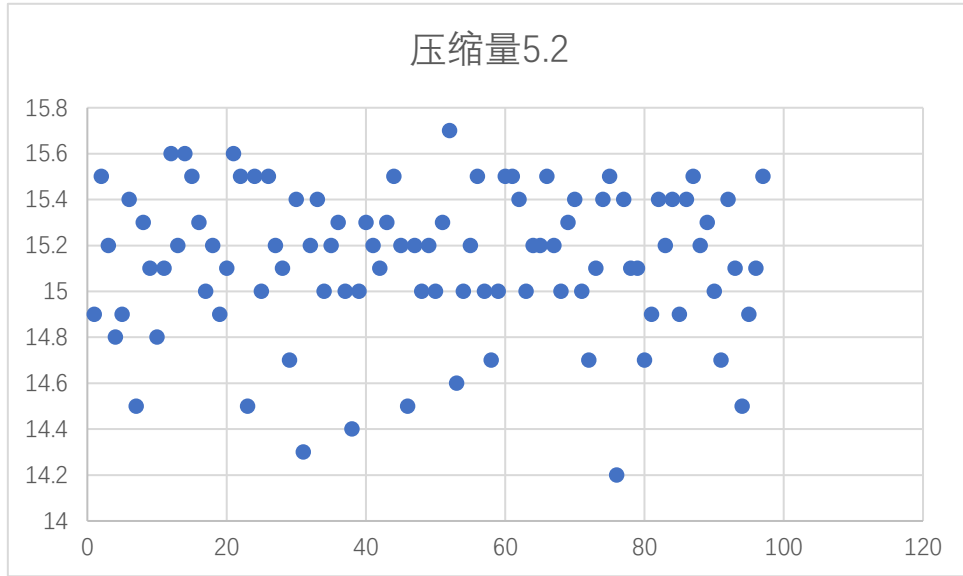


图 8-9 压缩量对弹速影响图 c

实测发现，以直径为 42.5mm 标准的弹丸，弹速最稳定的压缩量为 4.8mm。  
测试条件为室温 18 度，摩擦轮硬度 50，包胶厚度 6mm，直径 600mm。

## 8.2 版本迭代过程记录

表 8-1 机械版本迭代记录

版本	功能或性能详细说明	完成时间
V1.0	二级拨弹发射测试架	2022.7.22
V1.1	加装推杆用于发射	2022.8.2
V2.0	丝杠云台测试架	2022.10.1
V2.1	能够连续稳定发射大弹丸，且弹速较为稳定	2022.10.20
V3.0	定心由四钢轴更改为 v 型槽，完成整车装配，能够实现机器人既定动作	2022.11.15



表 8-2 软件版本迭代记录

版本	功能或性能详细说明	完成时间
V1.0	发射架测试程序，实现发射机构的发射逻辑	2023.12.26
V1.1	在上赛季工程的基础上融合新发射机构的功能	2023.1.19
V2.0	重构云台工程	2023.3.6
V2.1	发射与云台联调	2023.4.1
V2.2	完善底盘功率控制，实现功率控制下的底盘移动	2023.4.15
V2.3	添加云台微调模式	2023.4.28
V2.4	完善自定义 UI	2023.5.5
V2.5	制定板间通信报文规范并重写板间通信	2023.5.10

### 8.3 重点问题解决记录

为了更好地保证每一次迭代都解决当前版本遇到的最棘手问题，也为了确定是否需要机器人迭代，我们在日常工作中对重点问题进行统计，在钉钉协作平台记录问题内容、现象，由队长指定问题结局负责人。问题解决前、后进行问题现象记录、解决过程记录、问题原因记录。

定期将记录汇总成表分发给各队员，便于快速查找问题，并避免重复性工作。如表 8-3 部分重点问题解决记录汇总表所示。

表 8-3 部分重点问题解决记录汇总表。

序号	问题描述	问题产生原因	问题解决方案 &实际解决效果	版本号	解决人员
1	卡弹问题严重，测试拨盘和链路分开时不卡，但是组合后极易发生卡弹	链路设计不合理，阻力太大	增加拨盘刚度，增加电机输出，卡弹出现概率减少，但是拨盘容易卡脱齿	V1.0	机械组成员：柴夕泽

序号	问题描述	问题产生原因	问题解决方案 &实际解决效果	版本号	解决人员
2	黑色玻纤板雕得齿条，调试时容易出现滑齿	材料硬度不够	更换不锈钢	V2.0	机械组成员：柴夕泽
3	pitch 静态时受力容易变形	丝杠布局不合理，起初电机位置不会发生变化，压力角过大	重新设计，电机底部加转轴	V2.1	机械组成员：柴夕泽
4	刚性预置有的弹丸在推杆力给到最大时，推不过去	预置整体的鲁棒性不强	更换较为软的预置，但是会出现大的射速波动	V2.1	机械工程师：柴夕泽
5	丝杠在转动过程中，头部左右晃动明显	由于装配和加工误差导致偏心，而此时用的是刚性联轴器	更换挠性联轴器，	V2.1	机械工程师：柴夕泽
6	弹丸容易卡在滑环、播轮上的螺母和梳子之间，导致拨盘脱齿或者断裂	滑环高度过于极限	滑环加高，原先拨齿处的螺丝更换为对锁螺丝	V3.0	机械工程师：柴夕泽
7	大弹丸枪口初速度不稳定，极差大且易出现过低值	推杆机构推进过程末段降速，无法保证弹丸进入摩擦轮的速度一致	更改推杆控制逻辑，做到推进过程中匀速极差减小，散布有所改善	V1.0	机械工程师：柴夕泽 软件工程师：李纪扬

序号	问题描述	问题产生原因	问题解决方案 &实际解决效果	版本号	解决人员
8	大弹丸弹速慢	推杆前推速度过慢	更改推杆前推速度并重新整定 pid 参数 散布有所收敛达到五米 90%	V3.0	机械工程师: 柴夕泽 软件工程师: 李纪扬
9	云台程序总是跑飞	板间通信 can 总线接反或程序时序错乱	重构云台程序	V1.0	软件工程师: 李纪扬
10	Pitch 轴定位不准确, 末段滑行	陀螺仪解算效果差	更换陀螺仪解算代码, 添加 Pitch 轴前馈控制, 重新整定 Pitch 轴参数	V2.0	软件工程师: 李纪扬
11	板间通信报文接收不完全, 发送多条的情况下只能收到第一条	can 总线挂载设备过多	报文分时发送, 所有报文能够正常收发	V2.0	软件工程师: 李纪扬
12	推杆正常校零却行程出错	3508 电机编码器值在重新上电后会发生变化	每次重新上电后执行一次校零流程	V2.0	软件工程师: 李纪扬

## 9 团队成员贡献

英雄项目组我队共投入 5 名队员参与开发，是我队最大的单兵项目组，其中机械队员 1 名，硬件队员 1 名，电控队员 1 名，算法队员 1 名，项目管理 1 名。每个人都做出了努力和贡献，源于项目管理的合理化，在整个项目进程中，队员工作协调有序进行，工作优于往年单兵种进度。表 6-1 为团队各成员的工作贡献。

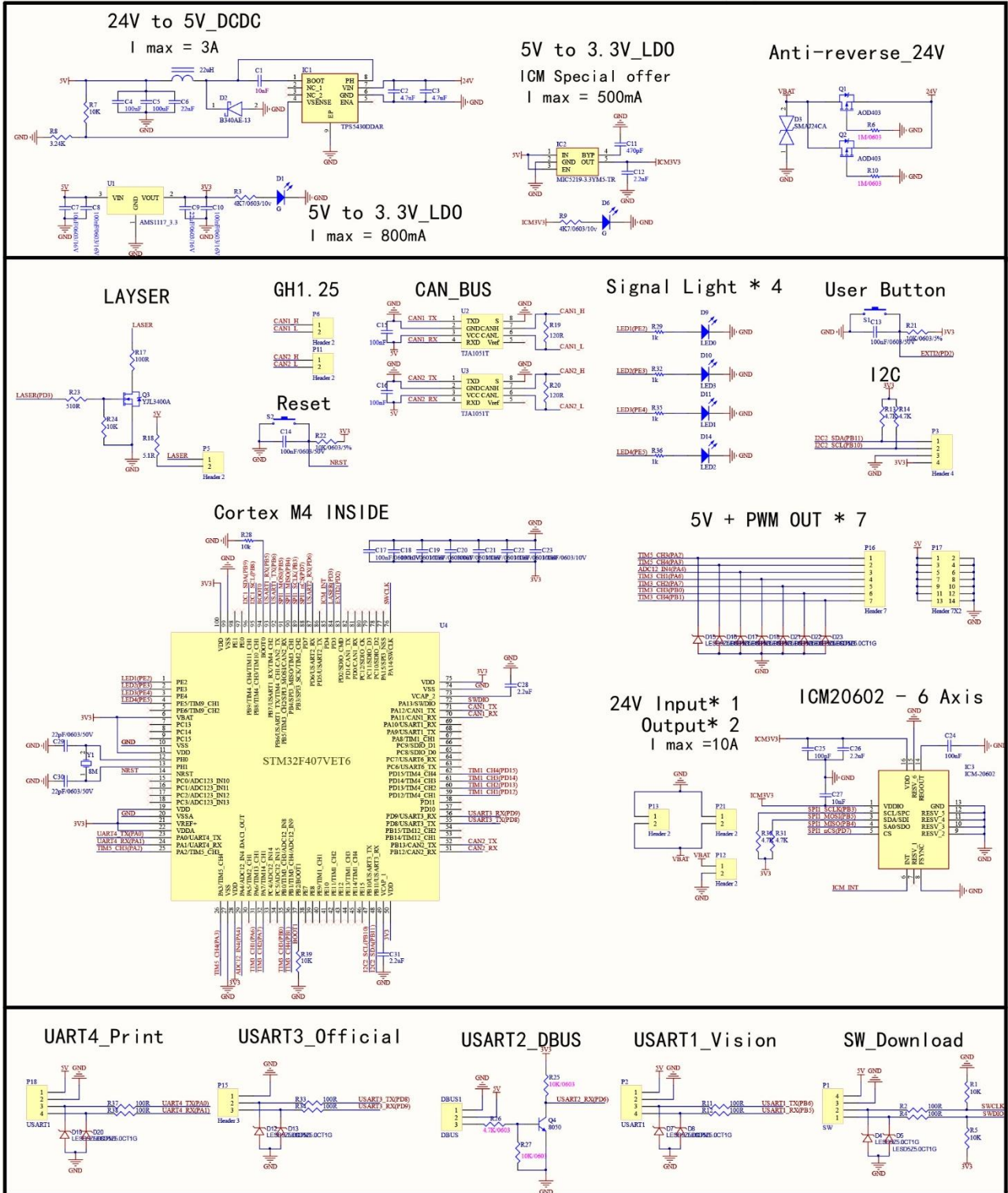
表 6-1 团队成员贡献

姓名	基本信息 <sup>1</sup>	主要负责工作内容描述	贡献度 <sup>2</sup>
柴夕泽	机械设计制造及其自动化、大二、机械开发负责人	负责整个机器人的所有机械结构设计、加工装配，包括云台、底盘、发射机构的结构设计和开发，以及机器人所有机械结构的迭代等。	35%
李纪扬	测控技术与仪器、大二、软件开发负责人	负责整个机器人的嵌入式开发，包括各个系统模块的控制、主控芯片的开发调用、变送系统的读取与处理、驱动系统的控制驱动、控制算法的优化、视觉系统的通信等。	25%
李香林	电子科学与技术、大二、硬件开发负责人	负责整个机器人的硬件系统开发，包括主板研发、驱动系统研发、变送系统布置与维护、系统布线、电路维护等。	10%
李博闻	机械、大三、组长	负责整个项目的进度把控、技术方案确定、机械部分技术指导、文档撰写等。	10%
崔肇峰	软件工程、大一、算法开发负责人	负责整个机器人的算法开发，包括图像识别、行为决策、目标预判、算法优化、深度学习等。	20%

注：1.基本信息包括：专业、年级、队内角色；2.贡献度以所有成员贡献度合计为 100% 计算。



# 附录 1 STM32F407VET6 主控板原理图





## 参考文献

- [1]董海东, 王晓芳. V 型块定位误差的分析与计算[J]. 中国工程机械学报, 2007,5(4):440-446
- [2] RM2021-北理工-中心供弹英雄机械开源[Z]. <https://bbs.robomaster.com/forum.php?mod=viewthread&tid=12241>. (Accessed on 08/23/2021).
- [3] RM2021-上海交通大学-交龙战队-英雄机器人机械技术开源[Z]. <https://bbs.robomaster.com/forum.php?mod=viewthread&tid=12241>. (Accessed on 08/23/2021).
- [4] RM2020-上海交通大学-交龙战队-步兵机器人机械技术开源[Z]. <https://bbs.robomaster.com/forum.php?mod=viewthread&tid=11054>. (Accessed on 08/23/2021).
- [5]RM2021-华南理工大学-华南虎战队-英雄机器人机械结构开源 [Z].<https://bbs.robomaster.com/forum.php?mod=viewthread&tid=12210>
- [6]RM2022-大连理工大学-凌BUG战队-英雄机器人机械开源  
<https://bbs.robomaster.com/forum.php?mod=viewthread&tid=22207>
- [7] RM2022-北京科技大学-Reborn-英雄机器人机械结构开源<https://bbs.robomaster.com/forum.php?mod=viewthread&tid=22189>

追求卓越 精进不止  
自强不息 责任担当



TRoMaC 2023 赛季

