



ROBOMASTER 2022
超级对抗赛及高校单项赛
华中科技大学狼牙战队
技术报告

2022年9月 发布

目录

1. 步兵机器人	7
1.1 其它学校步兵机器人分析综述（2.5）.....	7
1.1.1 步兵底盘选型.....	7
1.1.2 步兵云台选型.....	7
1.1.3 平衡步兵底盘选型.....	8
1.2 机器人功能定义（5）.....	8
1.3 机器人核心参数（2.5）.....	9
1.4 设计方案（25）.....	9
1.4.1 机械结构设计.....	9
1.4.1.1 整体设计、核心结构设计说明.....	9
1.4.1.2 主要零部件工艺选择.....	15
1.4.1.3 传感器设计安装、电路板的固定及走线情况.....	16
1.4.1.4 核心零件的有限元分析、静动力学分析.....	18
1.4.2 硬件设计.....	22
1.4.2.1 整机硬件框图.....	22
1.4.2.2 硬件详细设计.....	23
1.4.2.3 关键器件的选型.....	24
1.4.3 软件设计.....	26
1.4.3.1 系统架构.....	26
1.4.3.2 运行流程.....	28
1.4.3.3 重点功能.....	34
1.4.3.4 软件功能.....	35
1.4.4 算法设计.....	38
1.4.4.1 功能介绍与 pipeline.....	38
1.4.4.2 重要算法原理阐述、公式推导.....	39
1.4.4.3 算法性能、优缺点分析、优化方案.....	48
1.4.4.4 算法库介绍与接口说明.....	49
1.4.4.5 算法结果.....	50
1.5 研发迭代过程（10）.....	52
1.5.1 重点问题解决记录.....	54
1.6 团队成员贡献（2.5）.....	55
1.7 参考文献（2.5）.....	56
2. 哨兵机器人	58
2.2 机器人功能定义（10）.....	58

2.3 机器人核心参数 (5)	59
2.4 设计方案 (50)	60
2.4.1 机械结构设计	60
2.4.1.1 机械结构设计框图	60
2.4.1.2 整体设计方案	60
2.4.1.3 核心零件的有限元分析、静动力学分析	61
2.4.2 硬件设计	63
2.4.2.1 整机硬件框图	63
2.4.2.2 硬件详细设计	63
2.4.2.3 关键器件的选型	64
2.4.3 软件设计	65
2.4.4 算法设计	67
2.4.4.1 算法设计流程框图	67
2.4.4.2 设计方案描述	68
2.4.4.3 其他	69
2.5 研发迭代过程 (10)	69
2.5.1 版本迭代过程记录	69
2.5.2 重要问题解决记录	69
2.6 团队成员贡献	71
2.7 参考文献	73
3. 英雄机器人	74
3.1 其它学校英雄机器人分析综述	74
3.2 机器人功能定义	75
3.3 机器人核心参数	76
3.4 设计方案	76
3.4.1 机械结构设计	76
3.4.2 硬件设计	80
3.4.3 软件设计	83
3.4.4 算法设计	85
3.4.5 UI 设计	89
3.5 研发迭代过程	89
3.5.1 版本迭代过程记录	89
3.5.2 重点问题解决记录	90
3.6 团队成员贡献	92
3.7 参考文献	92

4. 工程机器人	93
4.1 其它学校步兵机器人分析综述（5）	93
4.1.1 工程底盘选型.....	93
4.1.2 工程上层的选型	93
4.2 机器人功能定义（10）	94
4.3 机器人核心参数（5）	94
4.4 设计方案（50）	95
4.4.1 机械结构设计	95
4.4.1.1 整体设计、核心结构设计说明	95
4.4.1.2 核心零件的有限元分析、静动力学分析.....	98
4.4.2 硬件设计	100
4.4.2.1 整机硬件框图.....	100
4.4.2.2 硬件详细设计.....	100
4.4.2.3 关键器件的选型	101
4.4.3 重要传感器选型说明	102
4.4.4 软件设计	102
4.4.4.1 软件方案.....	102
4.4.4.2 重点功能.....	103
4.4.5 算法设计.....	103
4.5 研发迭代过程（10）	104
4.5.1 版本迭代过程记录.....	104
4.5.2 重点问题解决记录.....	105
4.6 团队成员贡献	105
4.7 参考文献.....	106
5. 空中机器人	107
5.1 其它学校空中机器人分析综述（2.5）	107
5.1.1 无人机选型.....	107
5.2 机器人功能定义（5）	107
5.3 机器人核心参数（2.5）	108
5.4 设计方案（25）	108
5.4.1 机械结构设计	108
5.4.1.1 整体设计、核心结构设计说明	108
5.4.1.2 主要零部件工艺选择.....	109
5.4.2 硬件设计	111
5.4.2.1 整机硬件框图.....	111

5.4.2.2 硬件详细设计	112
5.4.2.3 关键器件的选型	113
5.4.3 软件设计	113
5.4.3.1 系统架构	113
5.4.3.2 运行流程	114
5.4.3.3 重点功能	115
5.5 研发迭代过程（10）	115
5.5.1 版本迭代过程记录	115
5.6 团队成员贡献（2.5）	116
6. 飞镖系统	117
6.1 其它学校飞镖机器人分析综述（2.5）	117
6.1.1 发射架选型	117
6.2 机器人功能定义（5）	117
6.3 机器人核心参数（2.5）	118
6.4 设计方案（25）	118
6.4.1 机械结构设计	118
6.4.1.1 整体设计、核心结构设计说明	118
6.4.1.2 主要零部件工艺选择	119
6.4.2 硬件设计	120
6.4.2.1 整机硬件框图	120
6.4.2.2 硬件详细设计	121
6.4.2.3 关键器件的选型	121
6.4.3 软件设计	122
6.4.3.1 系统架构	122
6.4.3.2 运行流程	122
6.4.3.3 重点功能	123
6.5 研发迭代过程（10）	123
6.5.1 版本迭代过程记录	123
6.6 团队成员贡献（2.5）	124
6.7 参考文献（2.5）	124
7. 雷达	125
7.1 其它学校雷达分析综述	125
7.2 机器人功能定义	125
7.2.1 战场视野	125
7.2.2 目标检测	125

7.2.3 辅助决策.....	125
7.3 机器人核心参数.....	126
7.4 设计方案.....	126
7.4.1 雷达相机选型.....	126
7.4.2 雷达运算设备选型.....	126
7.4.3 硬件设计	127
7.4.4 软件设计	128
7.4.4.1 系统架构.....	128
7.4.4.2 运行流程.....	129
7.4.4.3 重点功能及算法设计.....	131
7.5 研发迭代过程	133
7.5.1 版本迭代过程记录.....	133
7.5.2 重点问题解决记录.....	134
7.6 团队成员贡献	135
7.7 参考文献.....	135

1. 步兵机器人

1.1 其它学校步兵机器人分析综述（2.5）

1.1.1 步兵底盘选型

RM 赛场上步兵底盘的类型主要分为麦轮底盘、舵轮底盘和全向轮底盘。在上赛季中，许多队伍使用了舵轮结构的底盘，步兵小陀螺的速度有了明显的提升。但是在本赛季中，舵轮底盘转向的功率也计入底盘功率限制的控制范围之内，使得舵轮的速度优势被大大削弱；同时，由于舵轮步兵会增加 4 个舵向电机的重量，导致步兵重量大大增加，使得步兵的速度进一步降低，不再适合高机动的 RM 赛场。全向轮底盘相比麦轮底盘，原地旋转的效率更高，但直线效率更低。经过分析讨论，我们认为麦轮底盘更适合 RM 这个需要步兵进行快速机动全向移动的赛场环境，但也在分区赛之后尝试了全向轮底盘的方案。同时，我们也研发了一款舵轮底盘的步兵，用以测试在 2022 年新的功率规则之前步兵的悬挂系统，参赛的各队伍的选择集中在四轮独立悬挂和非独立的自适应悬挂之间。独立悬挂可以提供给步兵底盘设计更大的灵活度，整体重量也较轻，但步兵在上坡时可能会出现轮组悬空，抓地力不足的情况。自适应悬挂给底盘布局设计带来了很大困难，且悬挂系统复杂，难以装配及维护，重量也较重，但是能使步兵面对复杂地形时拥有更强的抓地能力。我们认为自适应悬挂虽然有着上述提到的缺点，但是其对步兵带来的性能提升更加重要，故我们还是选择开发了一款自适应悬挂系统。

1.1.2 步兵云台选型

现在赛场上的步兵云台，主要分为上供弹和下供弹云台，少部分队伍使用了半下供弹的结构。半下供弹结构，即弹仓仅随云台的 Yaw 轴一起转动，而不随云台的 Pitch 轴一起转动。

上供弹步兵有着结构简单，不容易出现卡弹，便于维护等优点。但是这种结构给云台的控制带来了较大的困难，第一，是弹仓及发射机构都集中于云台 Pitch 轴之上，驱动 Pitch 轴运动的电机负载大，且云台的重心分布会对云台的稳定控制有很大的影响；第二，由于弹仓放置于 Pitch 轴之上，步兵弹仓在满弹状态和空弹状态下弹仓的重量差距较大，会导致步兵云台 Pitch 轴的控制不能由一套 PID 参数适配所有情况。

下供弹云台主要的问题是给步兵底盘的布局带来很大的困难，且供弹链路长，难以装配及后期维护。且由于云台的重心分布难以调整，一般会出现测速模块一侧重量过大的问题，也给 Pitch 轴电机带来了很大的负载。

半下供弹云台可以解决上供弹和下供弹云台上述的大部分问题，但是仍会出现云台重心分布过于靠前的问题。结合上述问题，我们决定采用半下供弹的云台，重心分布问题使用重

力补偿装置加以解决。

1.1.3 平衡步兵底盘选型

大部分队伍的平衡步兵底盘仅仅使用简单的两轮结构，结构实现简单，但是机器人的上限较低，在面对崎岖路面时运动功能会面临极大的挑战。哈尔滨理工大学荣成校区 SPARK 战队开源的平衡步兵机器人使用了轮腿式的底盘结构，利用三连杆或四连杆的结构，机器人增加了一个腿部关节，使得机器人能够通过更加复杂的地形，还能实现跳跃、机器人上层高度改变等功能，大大提高了机器人的上限。我们决定采用该种底盘结构进行平衡步兵的设计；同时，我们也同时设计了一款简单的两轮结构的平衡步兵，用作备用方案。

1.2 机器人功能定义（5）

表 1.2.1 步兵机器人功能定义表

步兵	功能需求	需求分析/量化指标
底盘	全地形下不会出现翻车	避免出现翻车导致灾难性后果
	具备小陀螺功能	增加被击杀难度
	可以实现飞坡	提高战术灵活性
	机动性强	采用自适应悬挂系统，增加抓地能力；控制底盘重量小于 10kg
云台	实现重力补偿	保证射击稳定，100 发弹丸 5 米命中率 100%
武器系统	射击系统稳定	不出现卡弹，1000 发卡弹率为 0
	具备辅助瞄准功能	辅助提高瞄准精度，5 米吊射精度 100%
其他	反小陀螺辅瞄功能	反制敌方小陀螺，在 5 秒内可击杀敌方小陀螺 1 级步兵
	具有激活能量机关的能力	具有稳定激活大、小能量机关的能力，激活成功率大于 80%，用时少于 5s

1.3 机器人核心参数（2.5）

表 1.3.1 步兵机器人核心参数表

参数	描述
重量	17.5kg
尺寸（长宽高）	58.5cm×48.8cm×47.1cm
电容容量	1968.3J
最大工作电压	24V
电机数目与用途	GM6020×2：云台 Pitch 与 Yaw 轴驱动 M3508×4：底盘驱动 RM2006×3：摩擦轮及拨盘驱动
车体最大移动速度	2m/s@120W
爬坡角度	60° @120W 40° @80W

1.4 设计方案（25）

1.4.1 机械结构设计

1.4.1.1 整体设计、核心结构设计说明

一) 普通步兵悬挂部分

底盘采用自适应悬挂结构，搭配自制避震器及联动转轴完成四个轮组的联动运动。整体框架如下图 1.4.1.1:

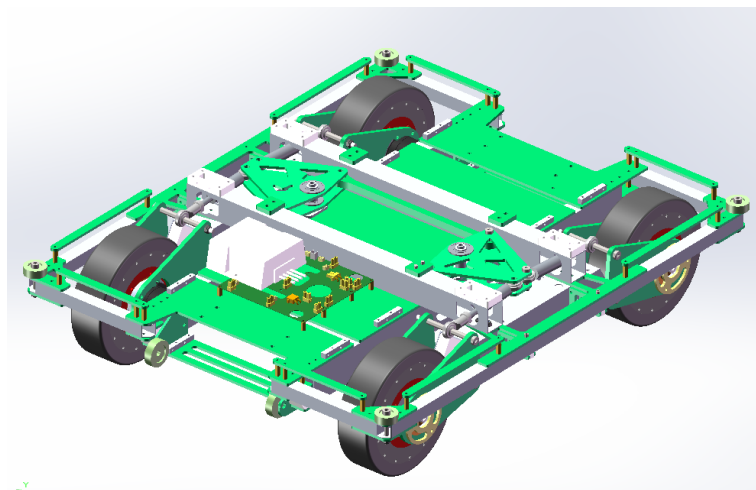


图 1.4.1.1 步兵底盘整体框架图

避震器设计如图 1.4.1.2:

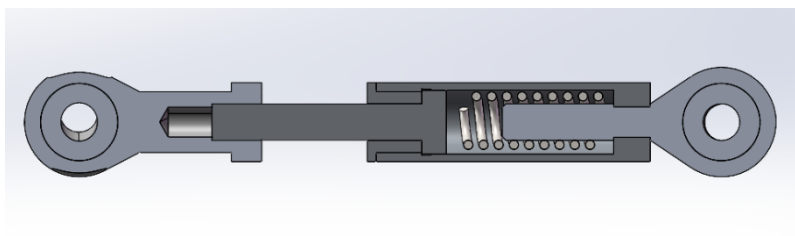


图 1.4.1.2 避震器剖面图

通过调节避震器弹簧的进度系数以保证单个轮组避震和四个轮组联动性能的平衡。

(二) 普通步兵防护部分

外框采用铝管板材拼接的方式提高防撞性能；外壳则利用合页实现快拆，方便布线和线路修改。



图 1.4.1.3 防护外壳效果图

(三) 平衡步兵底盘部分

平衡步兵底盘主要采用板材拼接的方式，制作装配简单，方便迭代更新。其中通过

机械结构对机器人腿部活动范围进行限位，以便机器人在不需要使用关节电机时，利用限位时机器人停留在最低点，减小关节电机的负载。

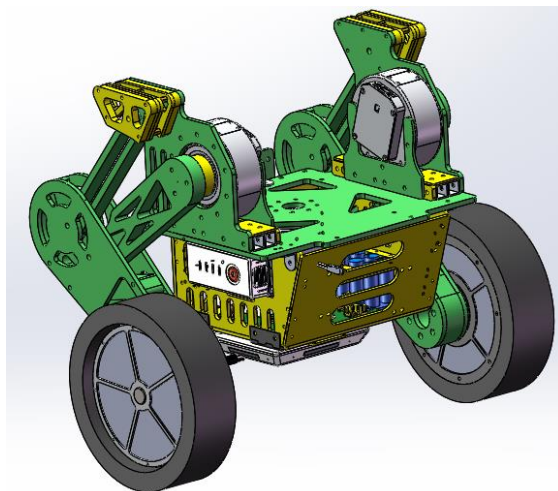


图 1.4.1.4 平衡步兵底盘效果图

（四）自适应步兵 2.0 底盘部分

自适应步兵底盘 2.0 仍然采用了自适应的底盘结构，但将原本的避震器分成了液压避震器和鱼眼连杆两个部分，即保证了自适应效果，又能避免通过连杆的传动来达到缓冲的效果，相较于最初的自适应底盘具有更可靠的稳定性，同时飞坡时减震效果良好，能有效减少对电路硬件的冲击。

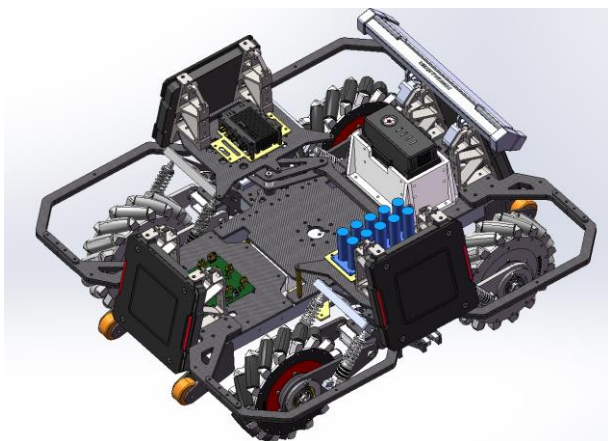


图 1.4.1.5 自适应底盘 2.0 效果图

（五）自适应步兵 2.0 防护部分

自适应步兵 2.0 防护部分利用合页和卡扣的设计、组合，实现快拆，更加便于比赛前后对机器人及时拆卸、维修。

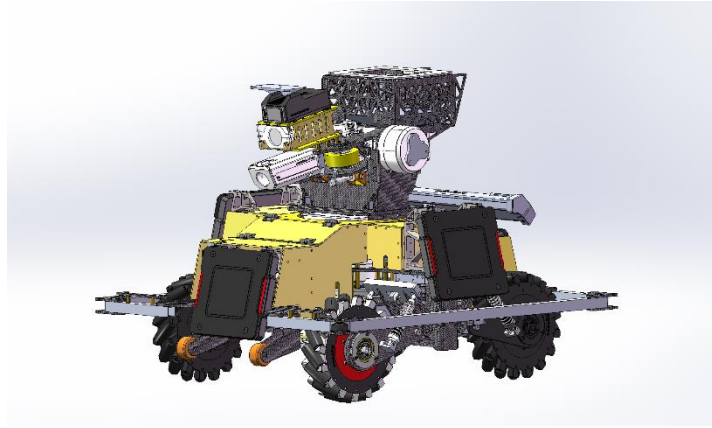


图 1.4.1.6 自适应步兵 2.0 整车效果图

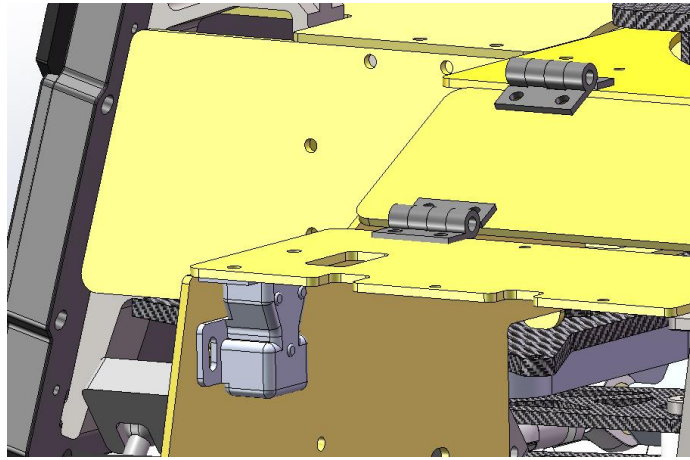


图 1.4.1.7 自适应步兵 2.0 快拆部分示意图

(六) 全向轮步兵

全向轮底盘采用独立悬挂进行避震，结构有所改优化改良，实际测试时机器人在各个场合均表现出比较好的稳定性。

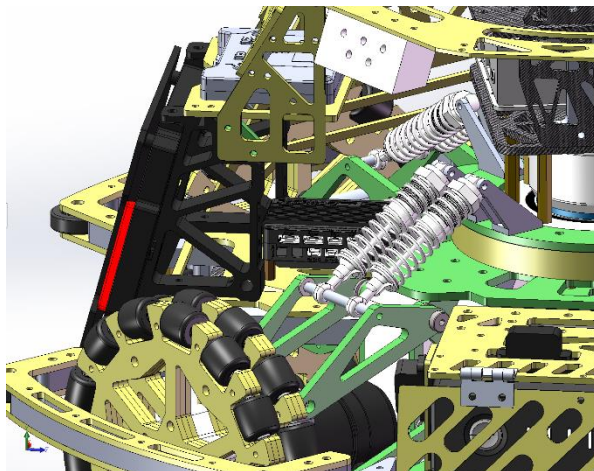


图 1.4.1.8 全向轮底盘悬挂部分示意图

全向轮防护部分设计采用扭簧合页等零件，实现车身组件的快捷拆卸。

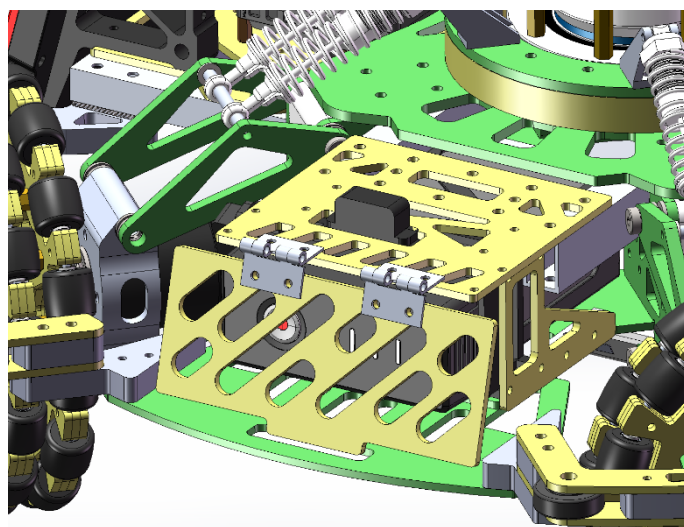


图 1.4.1.9 全向轮底盘部分示意图

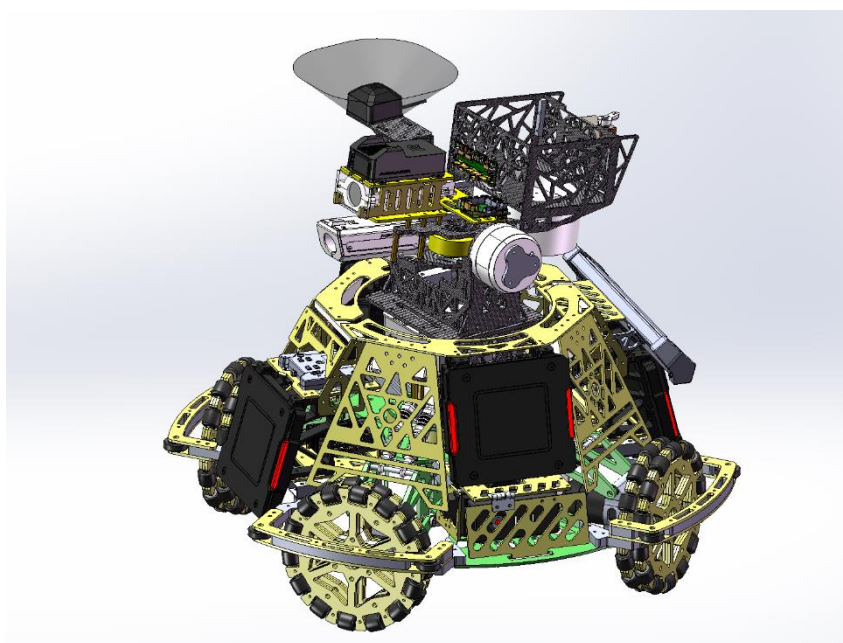


图 1.4.1.10 全向轮步兵整车效果图

(七) 22 年分区赛步兵

22 年分区赛步兵底盘采用独立悬挂结构，实际上场表现较为稳定，但轮组避震器的设计有不合理之处，连杆处容易形变，后期改杆为板后有所改善。防护改进为快拆结构，与步兵组设计思路相统一，方便日常维护和拆卸。

图 1.4.1.11 全向轮步兵整车效果图（见下页）

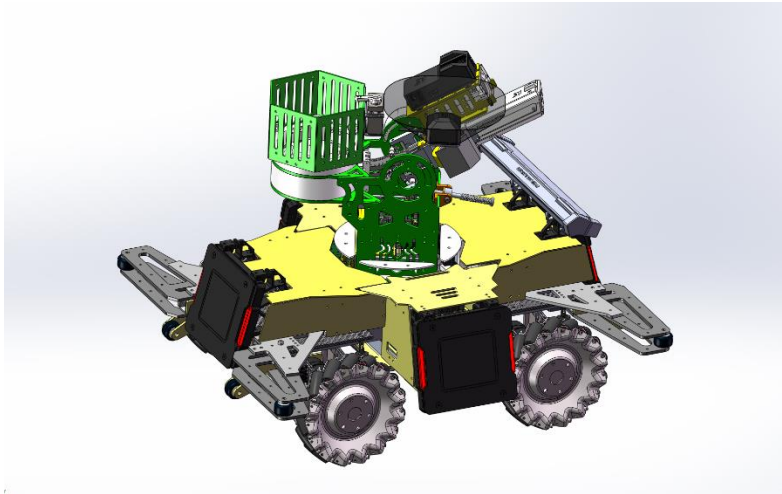


图 1.4.1.12 分区赛步兵整体效果图

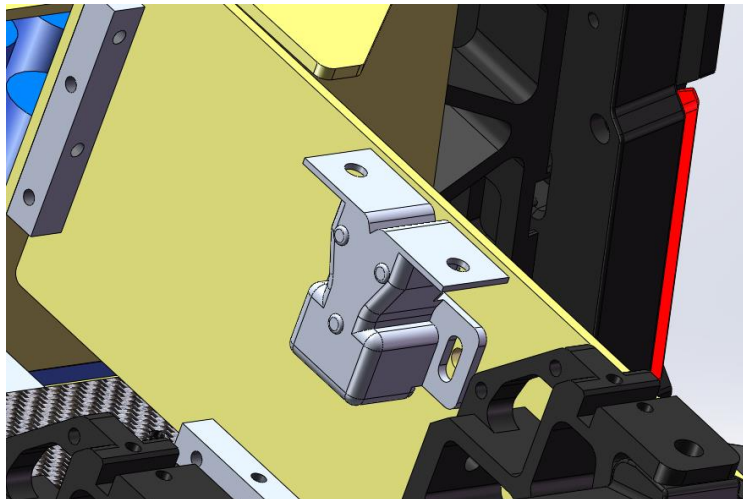


图 1.4.1.13 分区赛步兵防护快拆效果图

(八) 云台部分

Yaw 轴连接采用 6020 电机倒置结构，大幅减小电机轴向负荷；Pitch 轴转动采用 6020 电机直连结构，提高响应速度。

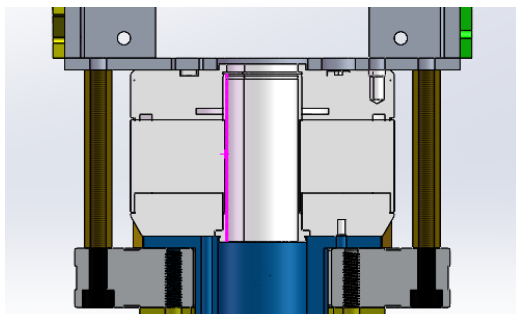


图 1.4.1.14 Yaw 轴结构剖面图

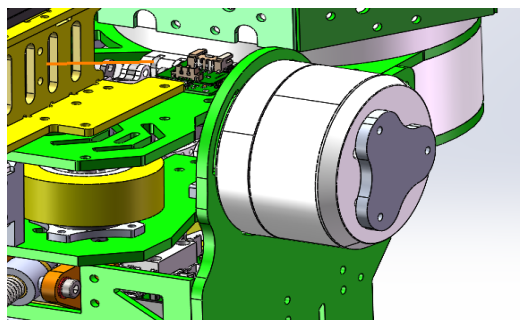


图 1.4.1.15 Pitch 轴结构图

(九) 发射机构

发射机构弹舱采用半下供弹设计；供弹链路部分采用滑槽设计，能在保持枪管自由转动的同时缩短供弹距离；云台下方添加重力补偿装置减小 Pitch 轴电机负荷。

1.4.1.2 主要零部件工艺选择

我们的主要零部件的材料及加工方式如下表 1.4.1.1 所示。

表 1.4.1.1 步兵主要零件材料及加工方式表

零件名	材质	加工方式
拨盘	PLA	3D 打印
弹舱	PLA	3D 打印
电路板滑轨	PLA	3D 打印
滑槽连接件	PLA	3D 打印
6020 电机联轴器	6061 合金	CNC
pitch 连接件	6061 合金	CNC
避震器	6061 合金	CNC

底盘联动转轴	6061 合金	CNC
联轴器压片	45 碳钢	CNC
轮组加工件	6061 合金	CNC
摩擦轮固定座	6061 合金	CNC
四孔转接件	6061 合金	CNC
云台架底座	6061 合金	CNC
转轴连接件	6061 合金	CNC
6020 垫板	环氧	雕刻
弹舱盖	玻纤	雕刻
弹舱盖 pc 盖	PC	雕刻
底盘传动杆	玻纤	雕刻
底盘联动板	玻纤	雕刻
底盘中板	玻纤	雕刻
底盘装甲支撑	玻纤	雕刻
管道轴承约束板	玻纤	雕刻
云台承重板	玻纤	雕刻
云台固定板	玻纤	雕刻
底盘铝框框架	铝管	金属切割
底盘外框防护	铝管	金属切割
6020 定子固定座	聚甲醛	铣削

1.4.1.3 传感器设计安装、电路板的固定及走线情况

(一) 步兵云台陀螺仪的安装

步兵云台陀螺仪的安装如下图 1.4.1.16 所示。为了避免摩擦轮电机产生的震动对陀螺仪产生的影响，我们采用单独架起一个平台安装陀螺仪；同时，为了减小陀螺仪的测量误差，我们将陀螺仪安装位置调整到了云台 Pitch 轴转轴上。

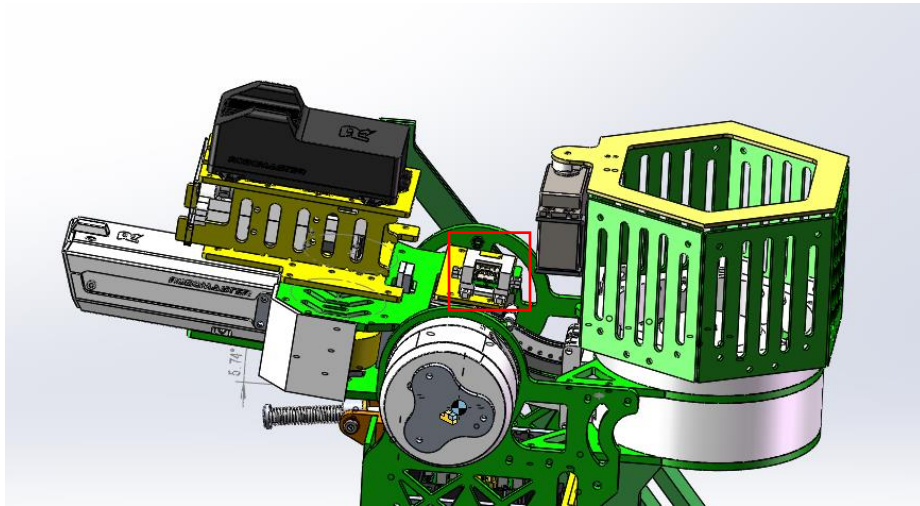


图 1. 4. 1. 16 步兵云台陀螺仪安装位置图

(二) 普通步兵底盘电路板固定及走线情况

步兵底盘预留了足够的空间用于放置电路板、超级电容、电源管理等电路器件，使得这些部件均可以直接安装到步兵底盘正面，大大降低了后期维护的困难成功。

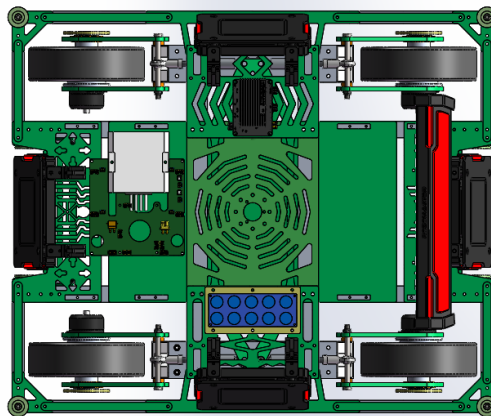


图 1. 4. 17 步兵底盘电气系统安装位置图

(三) 平衡步兵底盘电路板固定及走线情况

平衡步兵底盘采用板材拼接，上下分层的结构，用以安装电池、电路板、超级电容和电源管理模块等电路器件。同时，为了方便安装及后续维护，两层结构都设计了合页加锁扣的结构，不需使用工具即可打开平衡步兵底盘舱体，进行电气系统维护。

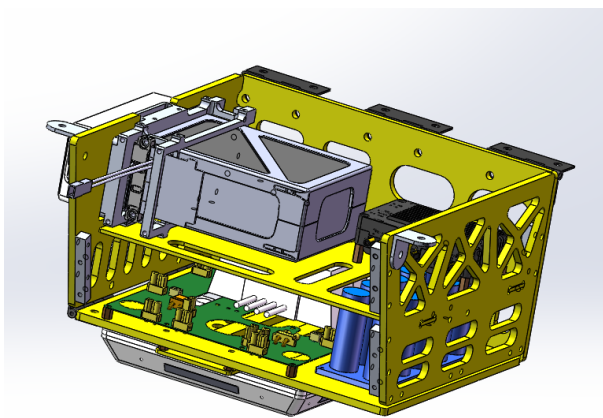


图 1.4.1.18 平衡步兵两层舱体结构图

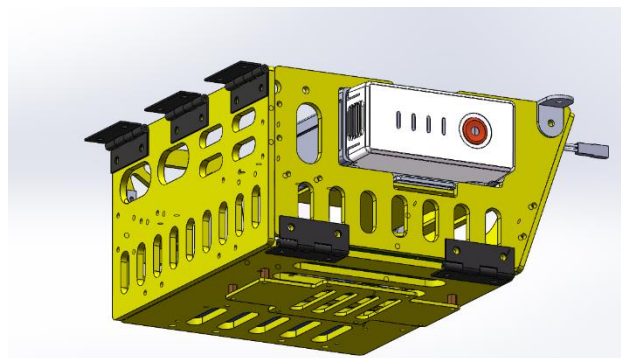


图 1.4.1.19 平衡步兵底盘合页位置示意图

(四) 步兵云台电路板固定及走线情况

步兵云台充分利用空间，将云台电路板及 PC 主机至于拼接云台的内部，同时设计了抽屉的结构，方便将固定电路板及 PC 主机的板子抽出及送入。这样的设计即方便了后续维护检修，也不用再额外对电路板进行防护。

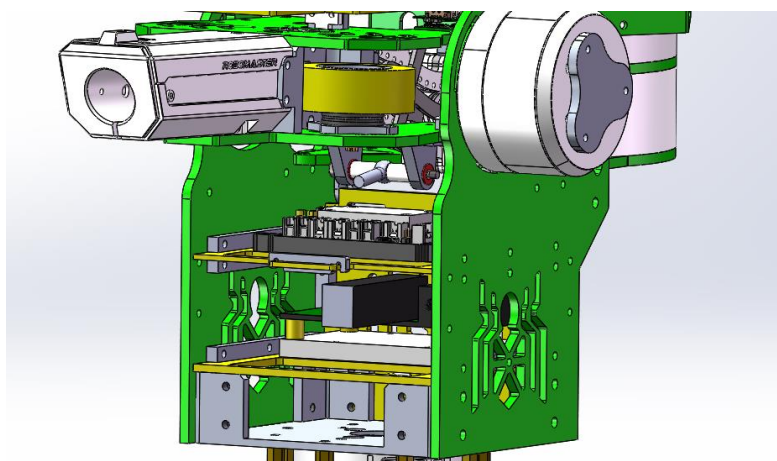


图 1.4.1.20 步兵云台电气系统安装位置图

1.4.1.4 核心零件的有限元分析、静动力学分析

(一) 关键零部件有限元分析

- 底盘中板：用于底盘和云台连接，要求承载云台（按照承载 80N 的力计算）后，纵向形变量小于 0.5mm。如下图 1.4.1.21 所示，该零件强度符合要求。

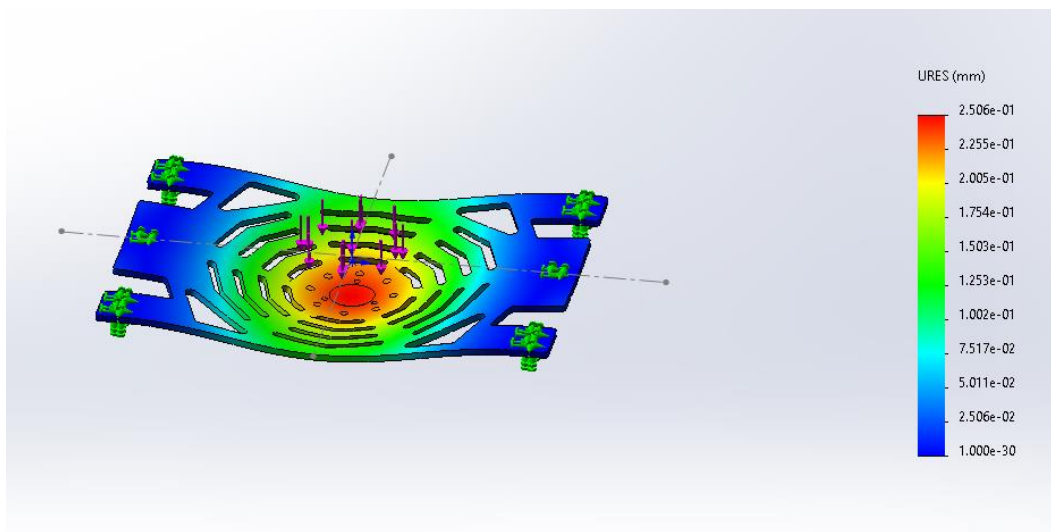


图 1.4.1.21 底盘中板有限元分析效果图

- 云台侧板：用于承载发射机构版，要求承受发射机构板重量（按照承载 30N 的力计算）后，纵向形变量小于 0.2mm。如下图 1.4.1.22 所示，该零件强度符合要求。

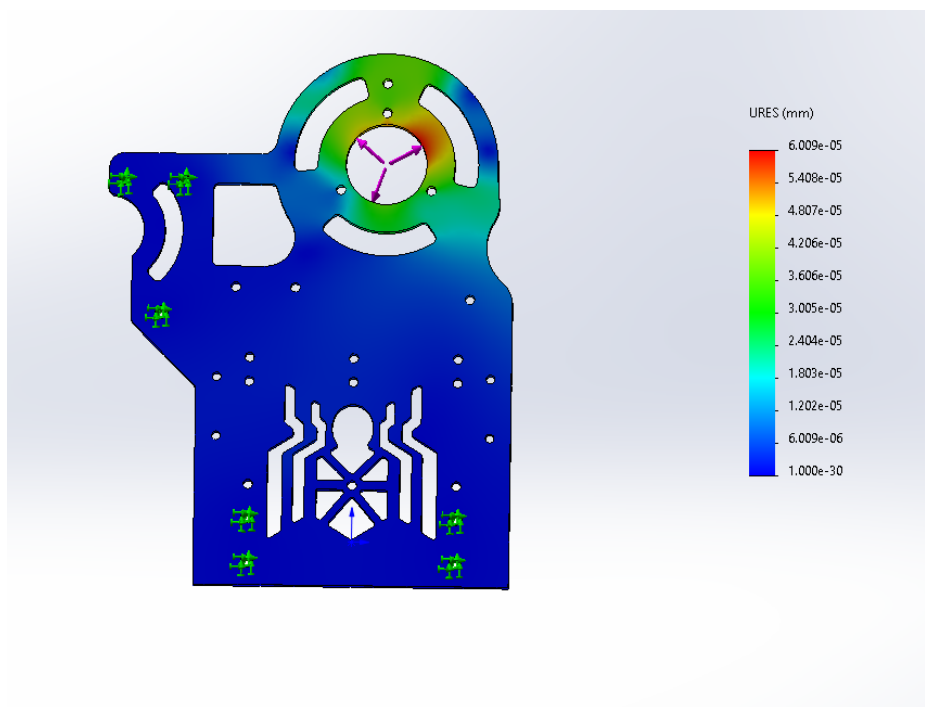


图 1.4.1.22 云台侧板有限元分析效果图

（二）重力补偿装置静动力学分析

采用广州工业大学开源的零原长弹簧模型实现重力补偿，具体实现原理如下：

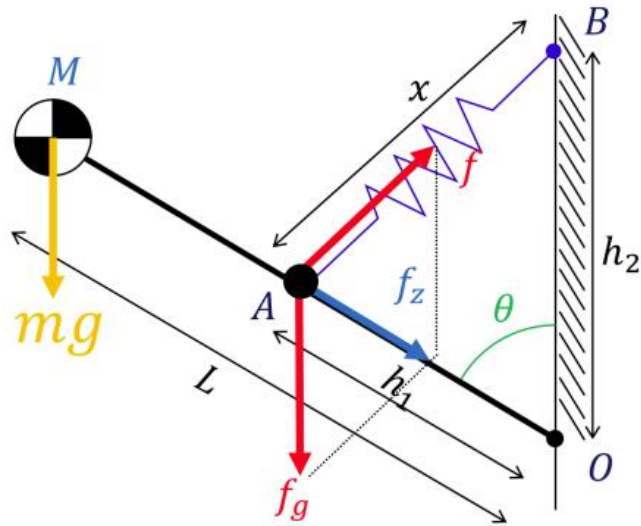


图 1.4.1.23 机构的简图和受力分析

云台 Pitch 轴承载整体质量为 m ，其质心在 M ，弹簧的劲度系数为 k ， x 为弹簧的形变量。

云台 Pitch 轴承载整体所受重力作用在 Pitch 轴转轴上的重力矩为：

$$\tau = mgL\sin\theta \quad (1)$$

重力矩在 A 点的作用等价于 f_g ：

$$f_g = \frac{mgL}{h_1} \quad (2)$$

图 1 结合静力学可知，显然 f 、 f_z 、 f_g 构成的力三角形与 $\triangle AOB$ 相似。则有：

$$\frac{f_g}{f} = \frac{h_2}{x} \quad (3)$$

将 (2) 代入 (3) 消去 f_g 得：

$$\frac{mgL}{fh_1} = \frac{h_2}{x} \quad (4)$$

将弹簧拉力 $f = kx$ 代入 (4) 消去 f 得：

$$\frac{mgL}{kxh_1} = \frac{h_2}{x} \quad (5)$$

注意到 (5) 左右分母均有 x ，约去得：

$$\frac{mgL}{kh_1} = h_2 \quad (6)$$

由此可得出实现完美重力补偿的弹簧劲度系数：

$$k = \frac{mgL}{h_1h_2} \quad (7)$$

具体计算参数计算如下：

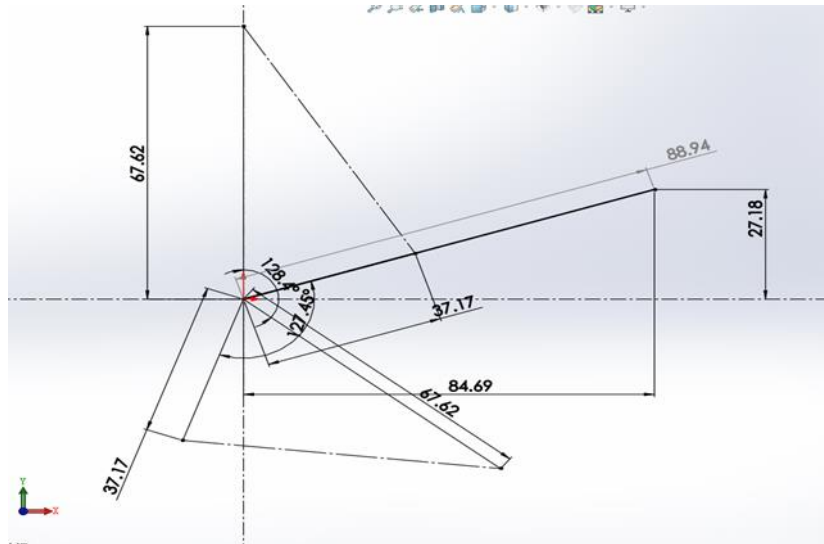


图 1.4.1.24 计算几何参数图

如图 1.4.1.24 所示： $L=88.94\text{mm}$ 、 $h_1=37.17\text{mm}$ 、 $h_2=67.62\text{mm}$ ，

在 SolidWorks 评估中得到云台 Pitch 轴承载整体质量 $M=0.72\text{kg}$ ，实际称量得到其质量为 1kg 。

计算得到完美重力补偿弹簧劲度系数 k ：

$$K = \frac{mgL}{h_1 h_2} = \frac{1 \times 9.8 \times 88.94}{37.17 \times 67.62} = 0.3468$$

考虑云台实际情况与重力补偿机构的干涉，可将 OA、OB 同时旋转 θ ：

$$\theta = 128^\circ$$

关于弹簧的选择：

弹簧劲度系数与线材的刚性模数、中径、线径、圈数的关系为：

$$K = \frac{G \times d^4}{8 \times N_c \times D_m^3}$$

弹簧材料选择碳素弹簧钢： $G=79000\text{N/mm}^2$

考虑经济效率，选择线径 0.8mm ，外径 9mm ，总圈数为 25 的弹簧，其劲度系数：

$$k = \frac{79000 \times 0.8^4}{8 \times 23 \times 8.2^3} = 0.3189$$

选用该参数的弹簧，经测试，重力补偿效果较好。

1.4.2 硬件设计

1.4.2.1 整机硬件框图

步兵的底盘和云台硬件框图如下图 1.4.2.1 和图 1.4.2.2 所示。

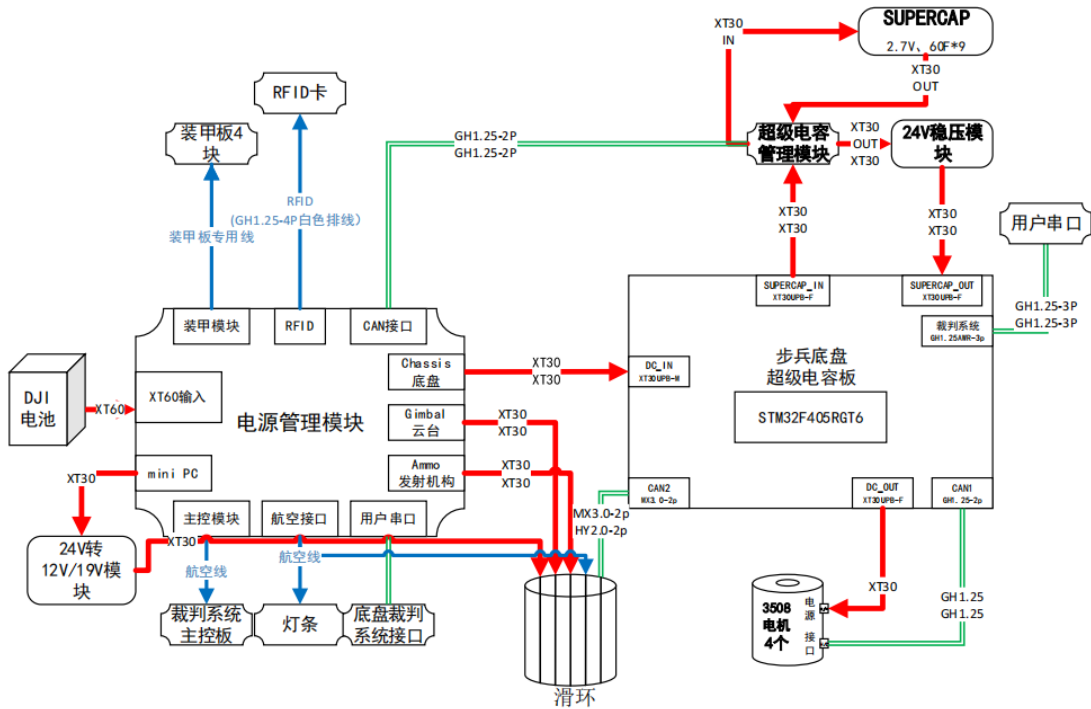


图 1.4.2.1 步兵底盘硬件框图

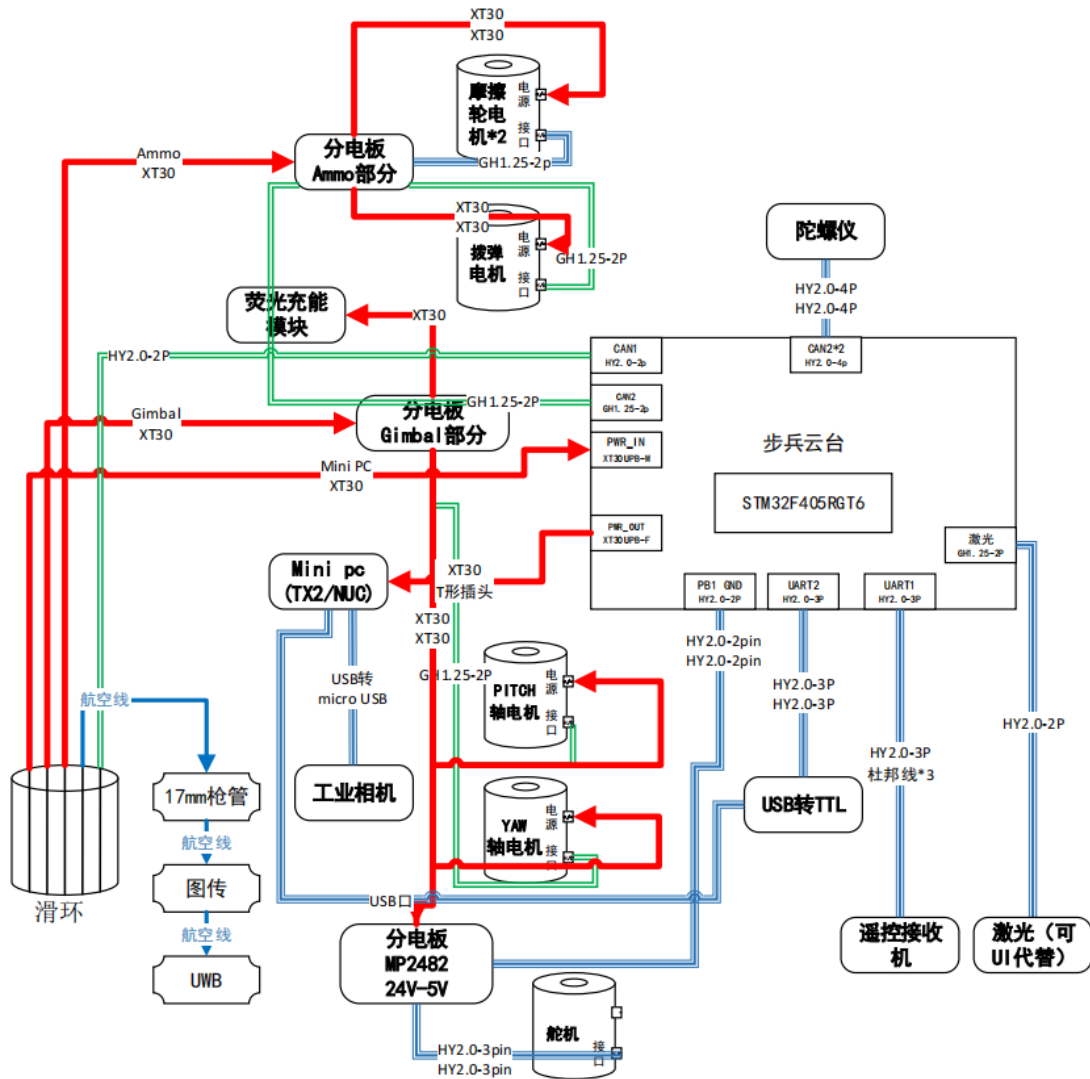


图 1.4.2.2 步兵云台硬件框图

1.4.2.2 硬件详细设计

(一) 底盘部分

根据步兵机器人硬件需求，底盘主控板集成超级电容充放电控制部分、底盘电机控制、裁判系统通信及云台通信部分，同时搭配一体化分电板，这样使板子的固定和拆卸都更加方便。为实现底盘完整功能，底盘需对输入功率以及输出给电机/超级电容的功率进行检测，便于控制防止出现超功率现象。整板由裁判系统电源管理底盘接口输入，经电压电流检测芯片，由超级电容充电控制部分决定是否给超级电容充电，超级电容电压值通过分压电路由主控 ADC 接口换算读取，实现闭环控制。给单片机系统供电部分先由开关电源将电压降到 5V，再用 LDO 去除开关电源产生的噪声并降压到 3.3V 给单片机供电，开关电源与线性电源级联，即提高了效率，又尽可能减小噪声。超级电容放电时经过 24V 稳压模块再到板子，输出电源可在超级电容与输入间进行选择，这里采用 LTC1473 芯片控制 4 个 MOS，分别控制两路电源供电，每路电源串联背对背连接 NMOS 开

关。根据需求选择合适的电源再经由输出功率检测后直接给电机供电。另外，主控板上搭载两个 CAN 收发器以满足 CAN 通信需求。

平衡步兵底盘：考虑平衡步兵底盘瞬时功率需求不大，因此我们没有使用超级电容。但由于关节电机不计入底盘功率，又需由底盘口控制，因此得额外添加继电器作为关节电源开关，当底盘 Chassis 口断电时，继电器断开，关节电机断电；当底盘 Chassis 口上电时，继电器导通，关节电机由电池直接供电。另外，平衡底盘需要使用陀螺仪，因此使用我们单独设计的陀螺仪，该模块独立于主控板外，搭载其他单片机主控，与主控板间使用 CAN 通信，具有较高灵活性。

(二) 云台部分

云台部分：云台供电分为 Gimbal、Ammo、MiniPC 三个部分，根据步兵机器人制作规范，其中摩擦轮和拨弹电机均由 Ammo 供电，Pitch、Yaw 轴电机、荧光充能模块以及弹仓盖舵机由 Gimbal 供电，Mini PC 口经 24V 转 12V 后再给 PC 和云台主控板供电（TX2 为 12V，NUC 则为 24 转 19V）。因此主控板设计时内部电源我们选择的开关电源芯片均适配 12V、19V、24V 供电输入，以提高其通用性。主控内单片机仍由开关电源（MP2451）搭配 LDO 供电，其他外设如遥控接收机、陀螺仪、激光均由过流更大的开关电源（MP2482）供电。同时考虑弹仓盖舵机在人为转动时可能会有的较大反冲电流，单独供电。这里我们也使用陀螺仪模块，该模块使我们在使用半下供弹云台时，不需要将整个主控板放到 Pitch 转动部分，减少空间需求同时利于走线。主控板与 TX2（NUC）之间配上自研 USB 转串口模块使用串口通信。

1.4.2.3 关键器件的选型

步兵电路的关键器件选型如下表 1.4.2.1 所示。

表 1.4.2.1 步兵关键器件选型表

器件类型	选型
主控芯片	STM32F405RGT6、STM32F042F6P6
开关电源芯片	MP2482、MP2451
5V 转 3V3 LDO	SPX3819M5-3.3L
TVS	SMBJ24A、SMCJ26A
超级电容	2.7V/60F
电容保护芯片	BW6101

功率检测芯片	INA260
充电控制芯片	BQ24640
双路电源选择芯片	LTC1473
USB 转串口芯片	CP2102
CAN 收发器	TCAN33x、MAX3051
MOS	CSD18543、CSD18532、AO3400, AO3401、SS8050、SS8550
陀螺仪	ICM20602, QMC5883L
晶振	8MHZ, 3225/5032 封装
二极管	IN5819, 1N4007, 1N4148, SS54

部分器件选型说明：

- 1) **STM32F405RGT6**: ARM32 位 Cortex-M4 架构 CPU, 与 Cortex-M3 相比, M4 提供了更丰富的指令集, 还有一个可选的 MPU 单元。在指令集方面, M4 比 M3 多了浮点运算指令、单周期的 MAC 指令、SIMD 指令和更多的饱和指令。该芯片是包含 FPU 单元的, FPU 是独立于 CPU 的一个浮点运算单元, 可以单独地使能或者关闭, 它支持单精度浮点数的运算和整数、单精度浮点、半精度浮点之间的数据格式转换。相较于之前一直使用的 STM32F105RBT6, 不仅只有在核心架构上的优化, 同时该 F4 芯片有更高的闪存、支持更高频的使用。在通信上, 该芯片可以支持两路 CAN 通信, 多个串口、SPI 和 IIC, 能够满足我们的通信需求。此外, 该芯片的价格相对友好, 具有较高的性价比。
- 2) **开关电源: MP2482、MP2451**: MP2451 是一个高频 (2MHz) 开关调节器, 集成了内部高侧高压功率 MOSFET。它提供单一的 0.6A (或更低) 高效输出与电流模式控制快速循环响应。输入电压范围从 3.3V 到 36V 均可, 输出电压为 0.8V 到 0.8*VIN, 能量转换效率高达 90% 以上。MP2482 是一个单片降压开关模式转换器, 内置内部功率 MOSFET。它在广泛的输入电源范围内实现 5A 连续输出电流, 具有良好的负载和线路调节。MP2482 给外部设备供电, MP2451 用于单片机供电。
- 3) **SPX3819M5-3.3L**: 低压差线性稳压器, 具有非常低的噪声输出且输出精度很高, 用于滤除高频开关产生的噪声, 给单片机提供稳定电压。
- 4) **超级电容: 2.7V, 60F (9 个)**, 即模组能量 $E = 1968.3$ (J), 满足规则需求, 同时最大电压为 24V 左右 (由于充电保护芯片), 与电池电压契合。
- 5) **BW6101**: 选择 BW6101 芯片作为超级电容充电保护芯片, 内置高精度基准, 确保输出精度达到 $\pm 1\%$ 。内置的功率管使得到过充保护后的泄流能力达到 0.7A (VIN=2.65V), 很

好地满足了超级电容级联使用时的充电特性。BW6101 可以通过外部端口选择为两种规格的超级电容进行充电保护，当选择端口为高电平时，对应保护点为 2.65V ($\pm 1\%$)，这也是我们所使用的保护点，与选择的 2.7V 电容配合使用。

- 6) **BQ24640**: 高效同步开关模式的超级电容充电器，支持最大充电电压到 26V，可以从 0V 开始充电而不需要预充电，充电效率超过 90%，最大电流为 10A，支持输入电压从 5V 到 28V。同时该芯片有相应功能指示灯，利于调试和维修，满足我们的使用需求。
- 7) **LTC1473**: 电源路径管理芯片，两种模式可以控制两路电源供电，搭配两队背靠背 NMOS 开关实现对应功能，方便我们主动控制使用电容还是电源供电，可以控制使用更大的瞬时功率。
- 8) **MAX3051**: 3.3V 供电的 CAN 控制器，具有 SOT23-8 的小封装。MAX3051 带有四种不同的操作模式：高速操作模式、坡度控制操作模式、待机操作模式和停机操作模式。高速模式允许数据速率高达 1Mbps。斜率控制模式可用于为高达 500kbps 的数据速率编程发射机的旋转速率。这减少了 EMI 的影响，从而允许使用非屏蔽的扭曲或平行电缆。在待机模式下，发射机被关闭，接收机被拉高，使 MAX3051 处于低电流模式。在关闭模式下，发射机和接收机都被关闭。该芯片的价格也比较实惠。

1.4.3 软件设计

1.4.3.1 系统架构

(一) 普通步兵

步兵总体包含云台系统与底盘系统两大部分。

云台系统主控芯片为STM32F405RG，其承载步兵机器人的云台操作任务，包含云台的Yaw, Pitch轴电机、弹舱盖、拨弹电机、摩擦轮等电机控制，负责枪管的朝向的调整、射击任务逻辑控制、底盘速度控制等步兵机器人整体控制中心。

底盘系统的主控芯片为STM32F105RB，其承载步兵机器人的底盘操作任务，接受云台系统的控制指令，完成运动分解、底盘跟随、超级电容以及裁判系统通信等等功能，是机器人移动的控制中心。

两大系统都使用了FreeRTOS操作系统来规划调度各个任务的运行，同时保证任务的完成与大量信息的通信的流畅，合理利用单片机资源，并且为了增加系统的鲁棒性，我们部署了看门狗来实时监测各任务的运行。

在调试过程中，皆以Jlink作为调试器，使用Jscope实时显示数据波形，远程时则使用VOFA利用蓝牙模块进行远程调试看波形图，利用Keil5的debug功能调整参数与逻辑（Windows 10 64位，MDK5.29版本，J-linkv8）。利用Keil5编译完成代码，通过Jlink下

载器下载入单片机芯片内，上电即可运行任务。另外依靠正点原子的无线调试器来调整底盘运动中功率的变化和缓冲能量的使用率。我们还将程序分为初始化硬件模块与逻辑应用模块，实现分层设计，避免两者相互干扰，并且便于后续调试。

（二）平衡步兵

平衡步兵总体包含云台系统与底盘系统两大部分。

云台系统主控芯片为STM32F405RG，其承载平衡步兵机器人的云台操作任务，包含云台的Yaw, Pitch轴电机、弹舱盖、拨弹电机、摩擦轮等电机控制，负责枪管的朝向的调整、射击任务逻辑控制、底盘速度控制等平衡步兵机器人整体控制中心。

底盘系统的主控芯片为STM32F105RB，其承载平衡步兵机器人的底盘操作任务，接受云台系统的控制指令，完成运动分解、关节控制、滑轮式位移、底盘跟随、超级电容以及裁判系统通信等等功能，是机器人移动的控制中心。

两大系统都使用了FreeRtos操作系统来规划调度各个任务的运行，同时保证任务的完成与大量信息的通信的流畅，合理利用单片机资源，并且为了增加系统的鲁棒性，我们部署了看门狗来实时监测各任务的运行。

在调试过程中，皆以Jlink作为调试器，使用Jscope实时显示数据波形，利用Keil5的debug功能调整参数与逻辑（Windows 10 64位，MDK5.29版本，J-linkv8）。利用keil5编译完成代码，通过Jlink下载器下载入单片机芯片内，上电即可运行任务。另外依靠正点原子的无线调试器来调整底盘运动中功率的变化和缓冲能量的使用率。我们还将程序分为初始化硬件模块与逻辑应用模块，实现分层设计，避免两者相互干扰，并且便于后续调试。

（三）全向轮步兵

步兵总体包含云台系统与底盘系统两大部分。

云台系统主控芯片为STM32F405RG，其承载步兵机器人的云台操作任务，包含云台的Yaw, Pitch轴电机、弹舱盖、拨弹电机、摩擦轮等电机控制，负责枪管的朝向的调整、射击任务逻辑控制、底盘速度控制等步兵机器人整体控制中心。

底盘系统的主控芯片为STM32F405RG，其承载步兵机器人的底盘操作任务，接受云台系统的控制指令，完成运动分解、底盘跟随、超级电容以及裁判系统通信等等功能，是机器人移动的控制中心。

两大系统都使用了FreeRTOS操作系统来规划调度各个任务的运行，同时保证任务的

完成与大量信息的通信的流畅，合理利用单片机资源，并且为了增加系统的鲁棒性，我们部署了看门狗来实时监测各任务的运行。

在调试过程中，皆以Jlink作为调试器，使用Jscope实时显示数据波形，远程时则使用VOFA利用蓝牙模块进行远程调试看波形图，利用Keil5的debug功能调整参数与逻辑（Windows 10 64位，MDK5.29版本，J-linkv8）。利用Keil5编译完成代码，通过Jlink下载器下载入单片机芯片内，上电即可运行任务。另外依靠正点原子的无线调试器来调整底盘运动中功率的变化和缓冲能量的使用率。我们还将程序分为初始化硬件模块与逻辑应用模块,实现分层设计,避免两者相互干扰,并且便于后续调试。

1.4.3.2 运行流程

(一) 普通步兵

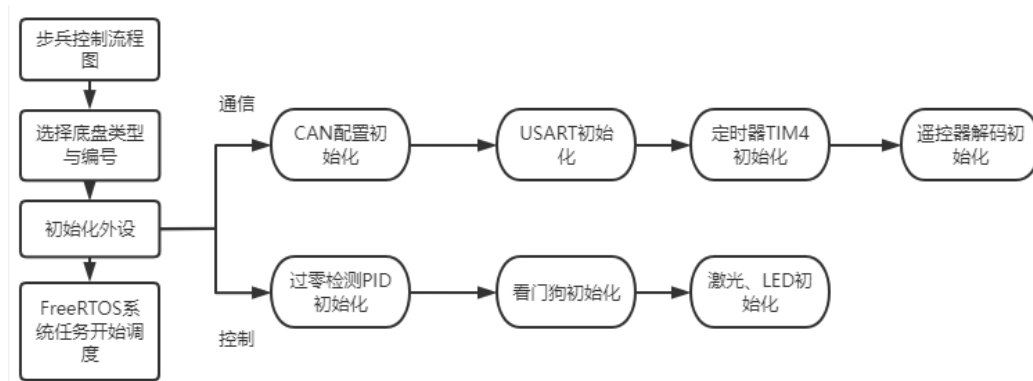


图 1.4.3.1 步兵初始化流程

首先上电后，主控芯片执行上图 1.4.3.1 的流程，会根据宏定义的底盘类型和编号，初始化所有外设设备，接着开始 FreeRTOS 的系统调度，持续接受控制信息。

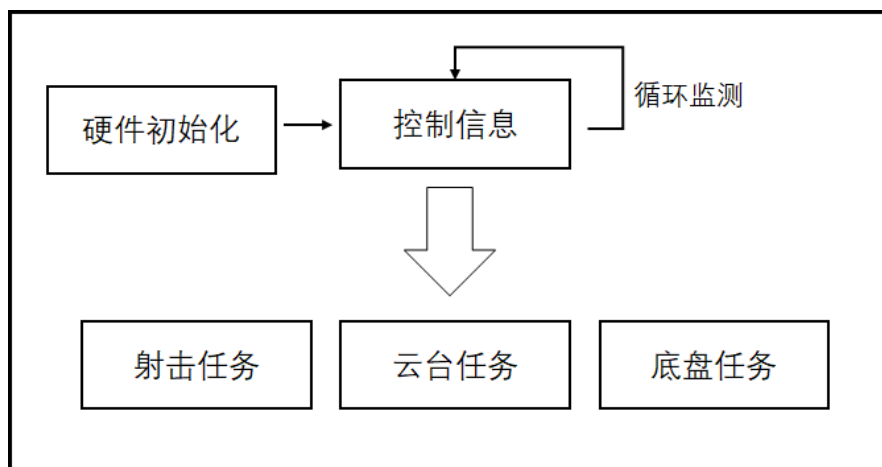


图 1.4.3.2 步兵总体控制框架

步兵的总体控制流程如图1.4.3.2，首先进行各个硬件模块的初始化，如CAN通信、USART通信、编码器采集、定时器配置与看门狗初始化配置等，接着步兵机器人将持续

接受外界遥控器的控制信息，当云台系统任务捕获到控制信息后，对其做出反应，包含云台运动、底盘运动以及射击三大部分，由于云台运动为射击任务服务，因此我们也将射击任务归到云台任务中，底盘运动包含运动控制、关节控制以及功率控制最后结算完成驱动电机。总体控制持续监测完成控制需求。其对应软件控制方案的具体任务如下图 1.4.3.3。

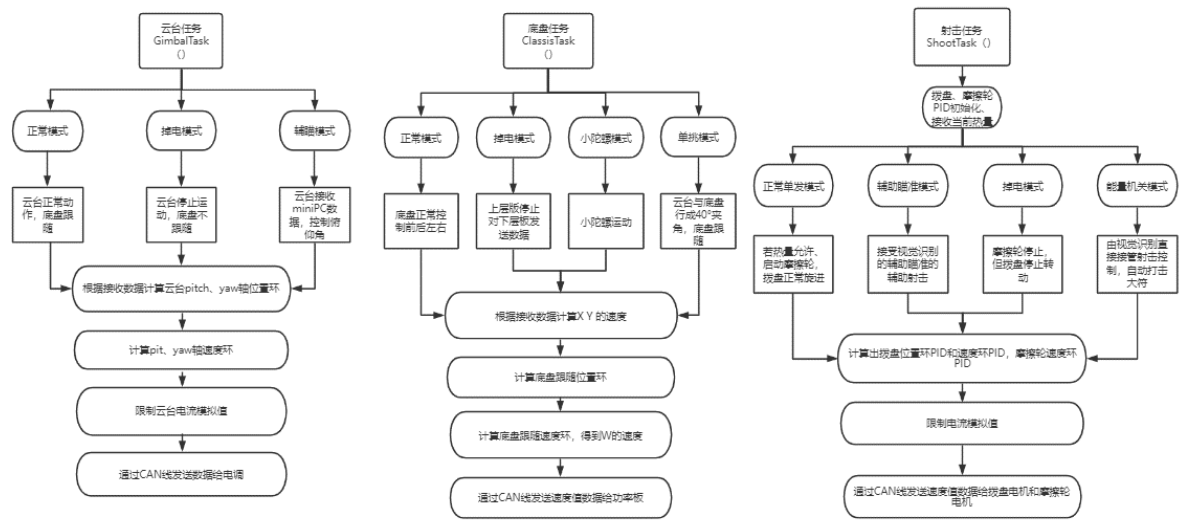


图 1.4.3.3 控制任务流程

步兵机器人在运行过程中，主要有硬件之间通信如下图1.4.3.4。

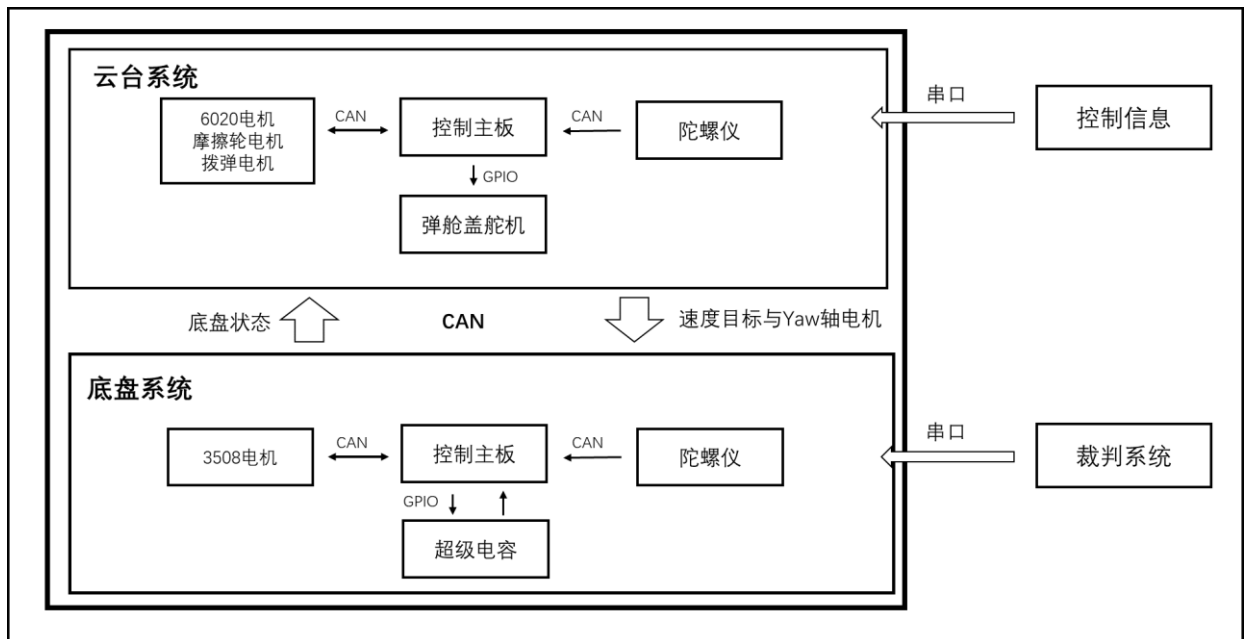


图 1.4.3.4 机器人通信信息流向

在机器人内部两大系统间的通信主要依靠CAN通信，云台系统向底盘系统发送速度的期望，底盘反馈云台实时底盘状态信息。

云台系统内，主控板分别接受6020云台Pitch、Yaw轴电机、摩擦轮电机、拨弹电机

以及弹舱盖舵机来反馈根据控制需求传输控制信息，并接受陀螺仪位姿信息校准云台姿态。

底盘系统内，控制主板接受电机的反馈来控制电机，并根据云台的需求控制超级电容的释放与否，陀螺仪信息校准机器人车体姿态。

在除此之外，会有裁判系统以及控制部分发来的信息，机器人接受控制解算来做出相应的运动与任务，接受裁判系统信息来设置车体的一些参数与获取战场的信息。

(二) 平衡步兵

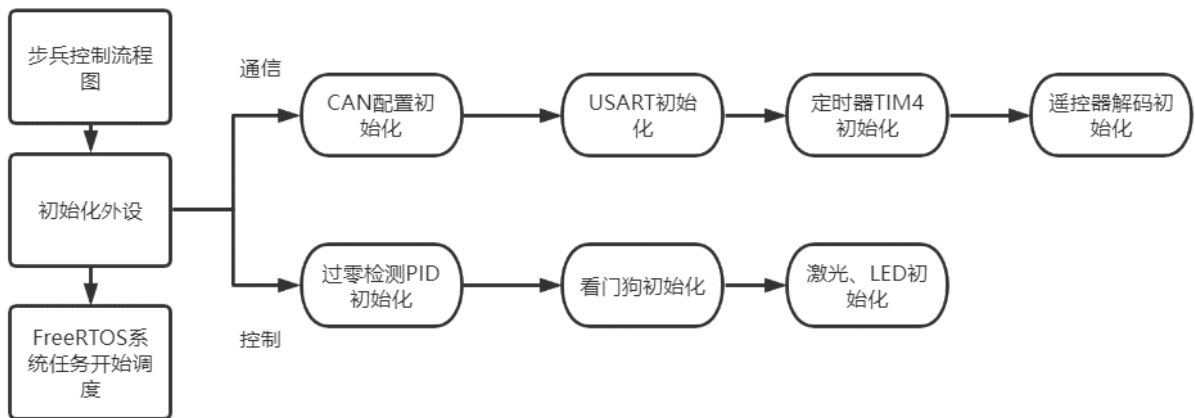


图 1.4.3.5 步兵初始化流程

上电后，主控芯片执行上图 1.4.3.5 的流程，会根据宏定义的底盘类型和编号，初始化所有外设。之后开始 Freertos 的系统调度，持续接受控制信息。

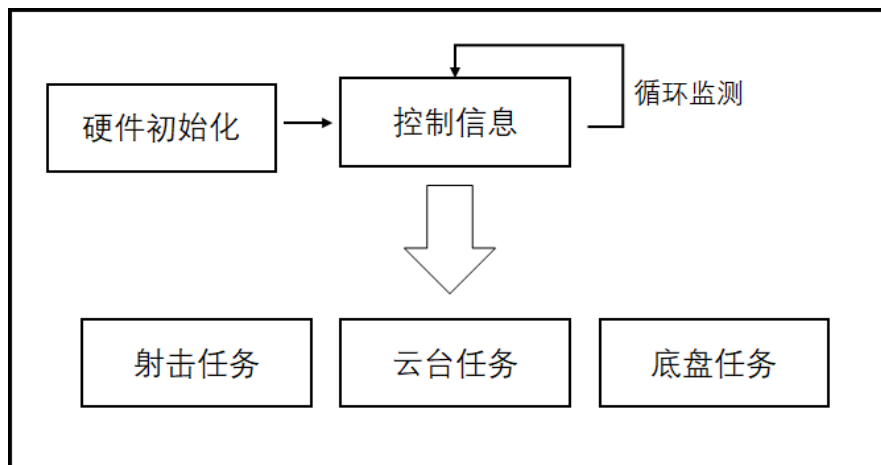


图 1.4.3.6 步兵总体控制框架

平衡步兵的总体控制流程如图x，首先进行各个硬件模块的初始化，如CAN通信、USART通信、编码器采集、定时器配置与看门狗初始化配置等，接着步兵机器人将持续接受外界遥控器的控制信息，当云台系统任务捕获到控制信息后，对其做出反应，包含云台运动、底盘运动以及射击三大部分，由于云台运动为射击任务服务，因此我们也将

射击任务归到云台任务中，底盘运动包含运动控制、关节控制以及功率控制最后结算完成驱动电机。总体控制持续监测完成控制需求。其对应软件控制方案的具体任务如下图 1.4.3.7。

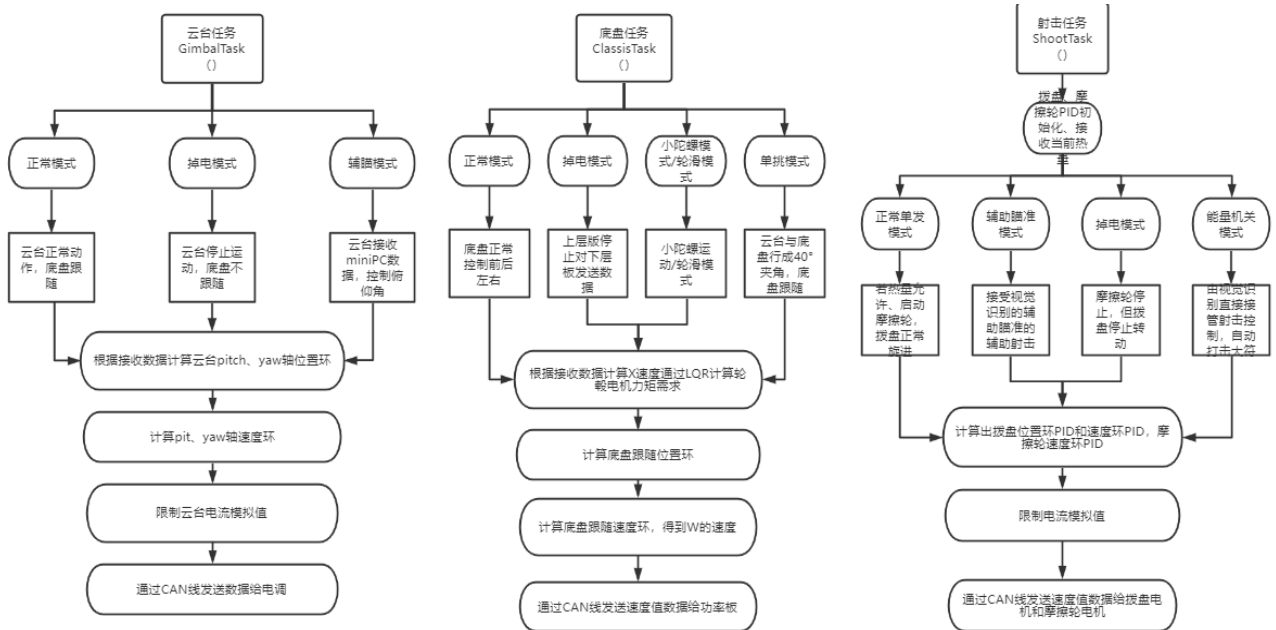


图 1.4.3.7 控制任务流程

平衡步兵机器人在运行过程中，主要有硬件之间通信如下图1.4.3.8

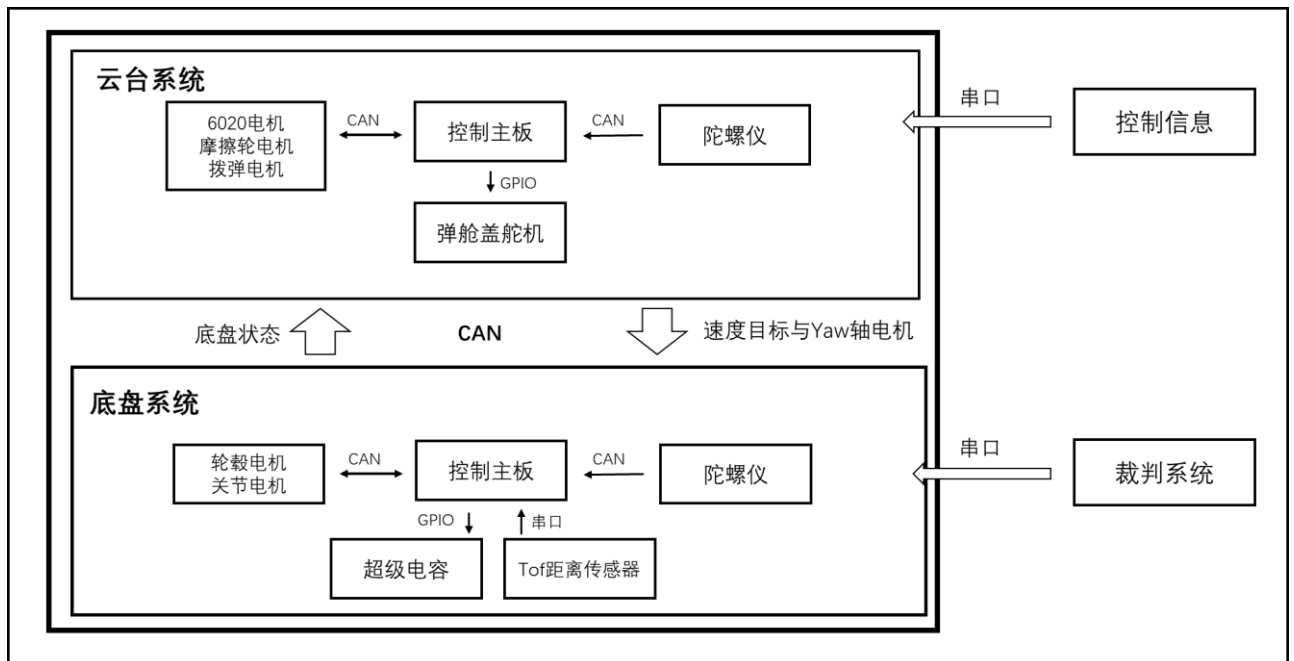


图 1.4.3.8 机器人通信信息流向

在机器人内部两大系统间的通信主要依靠CAN通信，云台系统向底盘系统发送速度

的期望，底盘反馈云台实时底盘状态信息。

云台系统内，主控板分别接受云台Pitch、Yaw轴6020电机、摩擦轮电机、拨弹电机以及弹舱盖舵机来反馈根据控制需求传输控制信息，并接受陀螺仪位姿信息校准云台姿态。

底盘系统内，控制主板接受轮毂电机与关节电机的反馈来控制电机，并根据云台的需求控制超级电容的释放与否，陀螺仪信息校准机器人车体姿态，保持车体平衡。

在除此之外，会有裁判系统以及控制部分发来的信息，机器人接受控制解算来做出相应的运动与任务，接受裁判系统信息来设置车体的一些参数与获取战场的信息。

(三) 全向轮步兵

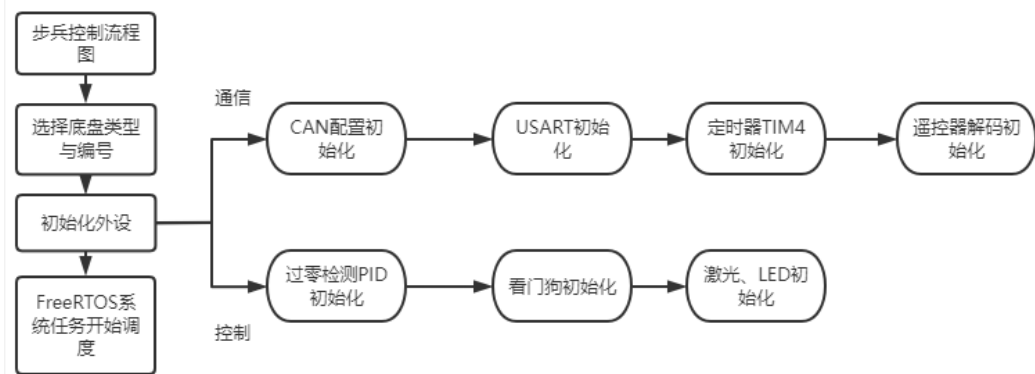


图 1.4.3.9 步兵初始化流程

首先上电后，主控芯片执行上图1.4.3.9的流程，会根据宏定义的底盘类型和编号，初始化所有外设设备，接着开始FreeRTOS的系统调度，持续接受控制信息。

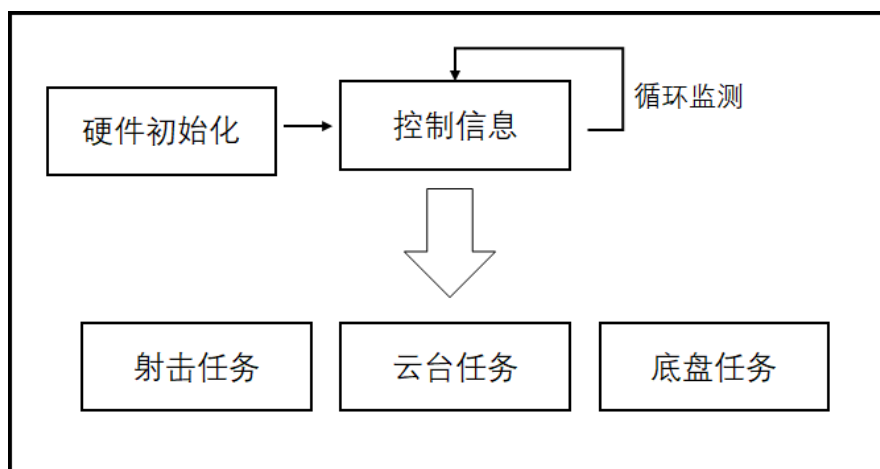
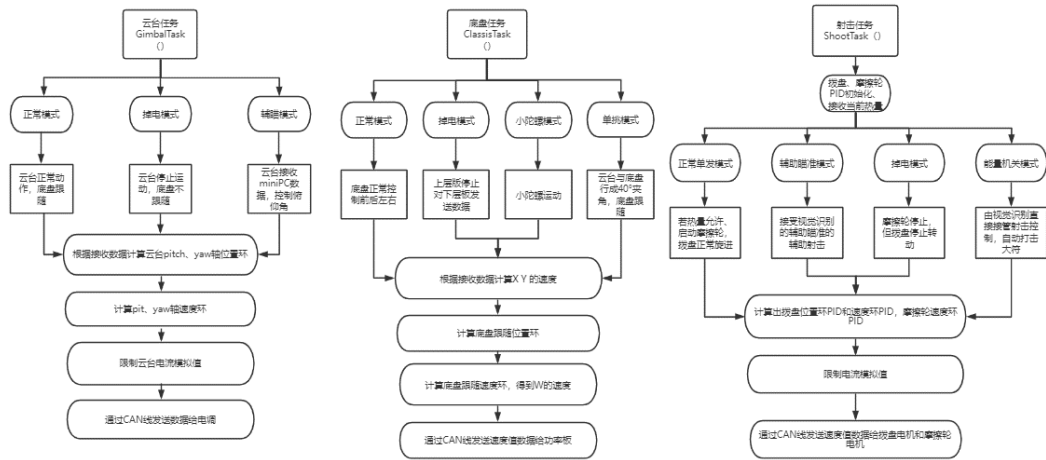


图 1.4.3.10 步兵总体控制框架

步兵的总体控制流程如图1.4.3.10，首先进行各个硬件模块的初始化，如CAN通信、USART通信、编码器采集、定时器配置与看门狗初始化配置等，接着步兵机器人将

持续接受外界遥控器的控制信息，当云台系统任务捕获到控制信息后，对其做出反应，包含云台运动、底盘运动以及射击三大部分，由于云台运动为射击任务服务，因此我们



也将射击任务归到云台任务中，底盘运动包含运动控制、关节控制以及功率控制最后结算完成驱动电机。总体控制持续监测完成控制需求。其对应软件控制方案的具体任务如下图1.4.3.11。

图 1.4.3.11 控制任务流程

步兵机器人在运行过程中，主要有硬件之间通信如下图1.4.3.12。

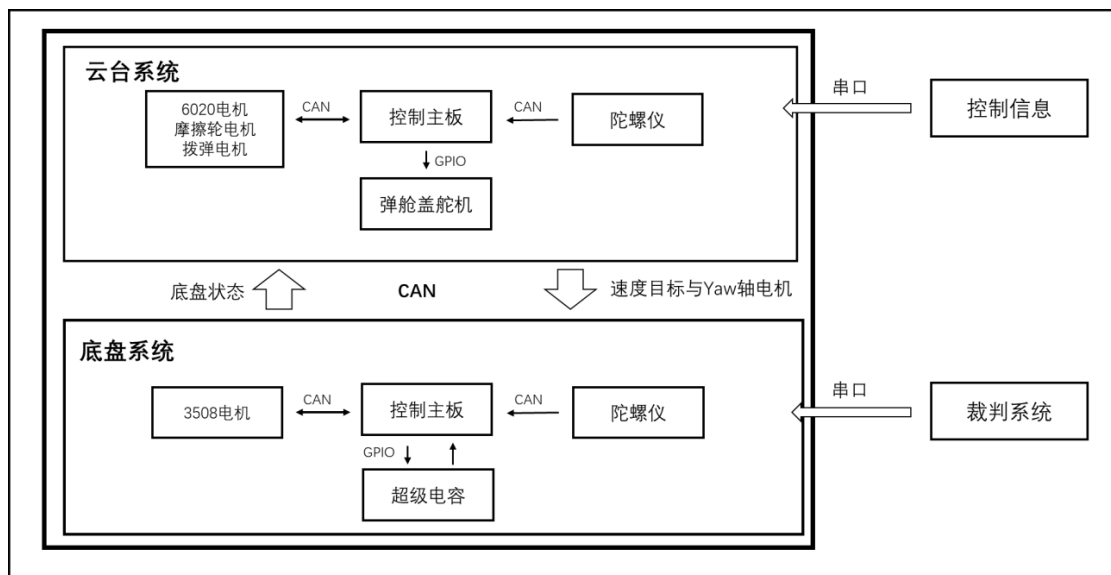


图 1.4.3.12 机器人通信信息流向

在机器人内部两大系统间的通信主要依靠CAN通信，云台系统向底盘系统发送速度的期望，底盘反馈云台实时底盘状态信息。

云台系统内，主控板分别接受6020云台Pitch、Yaw轴电机、摩擦轮电机、拨弹电机以及弹舱盖舵机来反馈根据控制需求传输控制信息，并接受陀螺仪位姿信息校准云台姿

态。

底盘系统内，控制主板接受电机的反馈来控制电机，并根据云台的需求控制超级电容的释放与否，陀螺仪信息校准机器人车体姿态。

在除此之外，会有裁判系统以及控制部分发来的信息，机器人接受控制解算来做出相应的运动与任务，接受裁判系统信息来设置车体的一些参数与获取战场的信息。

1.4.3.3 重点功能

(一) 普通步兵

底盘功率限制功能：通过前馈控制计算期望功率输出，来对实际输出进行控制，并且结合裁判系统功率检测模块，根据缓存能量的多少，引入一个 ReLU 的变种函数来对功率最大输出进行自适应调整，以达到充分利用缓存能量又不会超过扣血的效果，超过时则对设定电流多次迭代进行削减。同时，针对在盲道等起伏路面不平时，我们引入了电流环，配合速度环进行双环控制控制，使车身即使四个轮子受力不同的情况下也不会出现走歪的现象，而是保持直线稳定运动。同时为了解决电机电流反馈值噪声大的问题，我们通过 MATLAB 仿真建模，通过采集 3508 电机的数据输入进行 FIR 滤波器的设计，并获得相应参数，并应用于单片机程序中，最终取得了良好效果。

控制平滑化：如果是采用阶跃函数的形式对电机进行控制，无论是云台还是底盘，都可能会存在一定的问题。以底盘举例，阶跃函数的启停控制，不但可能会使轮子出现打滑的现象，还很大概率会出现大幅度超功率耗尽缓存能量，自取灭亡的行为。因此，我们在对于阶跃函数形式的控制信号，我们都采用了简单方便实现的斜坡函数来对信号平滑化处理。

双环电容充电控制：采用功率环和电流环双闭环叠加的方式来对超级电容充放电进行控制，稳定充分的利用好电池能量来为超级电容快速，高效率的充电。同时，针对像是启停等极限情况，会暂时停止电容充电来避免冲激电流的出现而超功率。

发射热量限制功能：同样是根据前馈控制的思想。通过一个射击允许标志位来进行热量控制。通过检测裁判系统反馈的实时枪口热量和冷却数据，计算下一发打出之后的热量会不会超过，对射击进行控制，同时也榨干了热量上限，同时防止因为超热量而死亡。

云台自适应模糊控制功能：加入了模糊 PID 控制算法，保证云台在各个位置都保持更好的稳定性，加快运动时的响应时间，降低静态时的角度偏差，保证步兵机器人在移动视角和进行设计任务时稳定发挥。

底盘控制模式切换和超级电容模块：提供基于键盘按键的底盘模式切换功能，可以实现机器人对角模式前进、基础的底盘跟随前进、小陀螺运动前进等功能，保证了操作手在机器

人遇到不同场景可以进行有效应对。另外，加入了超级电容模块，能够在短时间内提供非常大的功率输出并且不会违反裁判系统功率限制的规则，极大提高了机器人的机动性。

离线检测功能: 为了避免 IMU 或者电机等模块通信短线导致的机器人失控等危险情况的发生，提高系统的安全性。我们通过 FreeRTOS 提供的 API 来获取每次电机或者是 IMU、PC、遥控器等更新数据时间，然后在一个固定频率运行的任务中对这些数据更新状态进行处理。若是超过一定时间，模块数据没有更新，则认为该模块离线，立即挂起与该模块有关的任务，避免异常工作造成危险。当模块再次检测到的时候，则恢复任务的正常运行。极大的**提高了安全性和调试时对模块离线快速判断的速度。**

底盘跟随前馈控制: 以往为了使机器人更容易被操控，使用了 PID 反馈作为底盘跟随云台视角的策略，目前优化为前馈控制，使得跟随速度更快，响应更低，对于操作手来说更易操控。

(二) 平衡步兵

轮滑运动功能: 由于平衡步兵的结构特殊性，无法实现移动式小陀螺来进行自我保护的功能，但是由于关节的结构，我们模仿人类滑冰的动作设计的轮滑式位移，能够在一定程度上躲避子弹且快速位移。

复杂地面适应功能: 面对起伏路段，平衡步兵可以通过关节的调整来补偿地面对云台的影响，很大程度上增加了云台的稳定性和射击的准确性。

底盘功率限制功能: 通过采集裁判系统功率检测模块来对英雄机器人进行实时的功率配置控制，防止因为超功率而违反规则死亡。在起伏路面降低底盘电机转速，保证扭矩。

发射热量限制功能: 通过检测裁判系统反馈的实时枪口热量和冷却数据，对发射大弹丸进行限制，防止因为超热量而死亡。

云台自适应模糊控制功能: 加入了模糊 PID 控制算法，保证云台在各个位置都保持更好的稳定性，加快运动时的响应时间，降低静态时的角度偏差，保证英雄机器人在移动视角和进行设计任务时稳定发挥。

底盘控制模式切换和超级电容模块: 提供基于键盘按键的底盘模式切换功能，可以实现机器人对角模式前进、基础的底盘跟随前进、小陀螺运动前进等功能，保证了操作手在机器人遇到不同场景可以进行有效应对。另外，加入了超级电容模块，能够在短时间内提供非常大的功率输出并且不会违反裁判系统功率限制的规则，极大提高了机器人的机动性。

1.4.3.4 软件功能

(一) 普通步兵

测试舵轮步兵机器人的自旋平移功能时,我们利用机械导出的 SolidWorks 模型为 urdf 格式,再导入 Coppeliassim 软件内如下图 1.4.3.12。

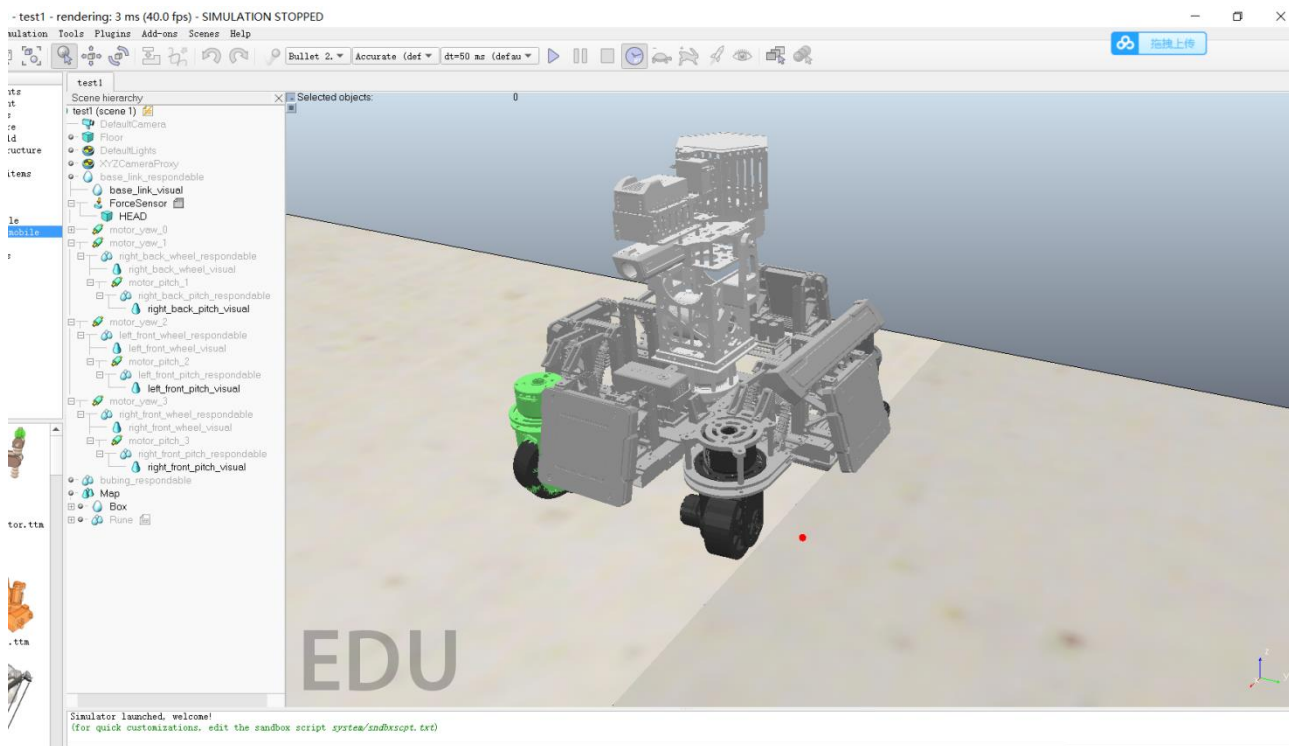


图 1.4.3.12 舵轮步兵 coppeliasim 仿真

然后编写 c++语言代码控制其轮组电机,完成运动分解的软件测试,效果良好,最后移植入 keil5 内,配合主控芯片成功实现真实步兵的分解,同时,其他大部分软件功能,都将会先在仿真环境内快速部署,合理调整逻辑后将会减小现实的调试成本。

- MATLAB 的 Simulink 工具进行云台、底盘 PID 参数调节时的前期仿真。首先根据机器人的参数,以及简单的动力学方程,进行拉普拉斯变换后描述系统,再利用 simulink 中的工具来搭建系统,进行离线前期的 PID 调参。同时也可以利用 MATLAB 的灰箱辨识、黑箱辨识等工具来借助输入数据的方式来获取系统的特征,但是我们团队大多数情况下采取前者方法,后两种则是疫情在家,训练梯队时采取的方法。
- MATLAB 的 System Identification :首先借助 Segger 的 JScope 工具采集数据,对机器人云台,底盘电机等部件做复频域分析,获取其性能参数,借此来确定其最佳控制频率,控制幅度等。并且也可以以此为指导来与机械组同学进行沟通并确定改进的思路和方向。

- 程序代码运行的正确性：主要通过 Keil 的 debug 功能，结合 watch window ， Segger 的 JScope,以及一些无线调试软件来进行程序代码运行的调试。

（二）平衡步兵

测试平衡步兵机器人的软件功能时，我们制作了 Webots 内的平衡步兵机器人的简易模型，并合理根据实际的世界环境设置了摩擦力等等物理参数，使得仿真效果更好。

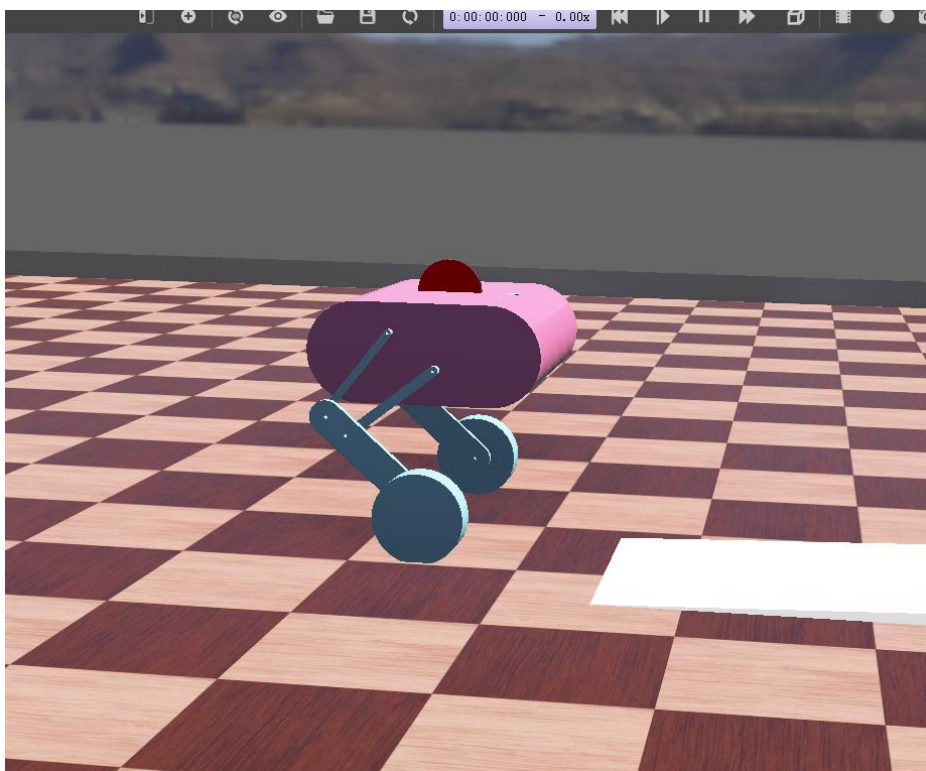


图 1.4.3.13 Webots 平衡步兵仿真

然后编写 MATLAB 的程序，实时显示扭矩等数据来帮助调试。

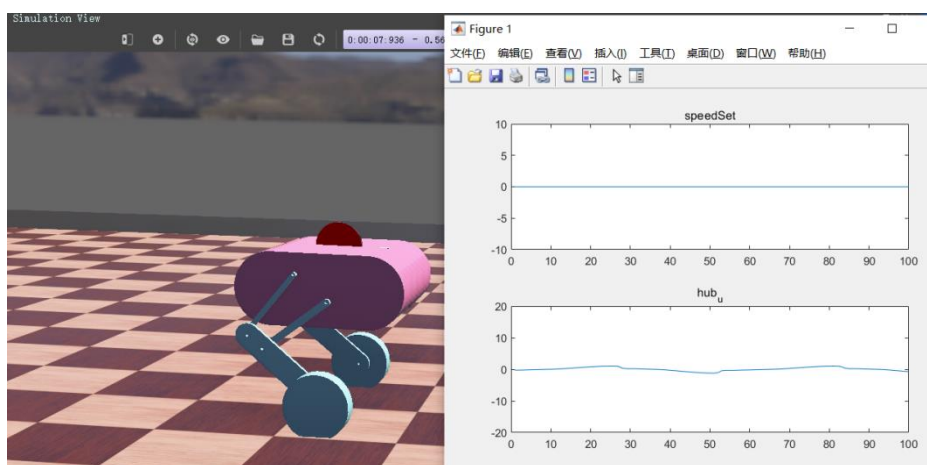


图 1.4.3.14 实时扭矩显示

最终成功测试了 LQR 控制算法在平衡步兵上的优秀表现，稳定度高，并且逐步加入了转向环、速度环等多个功能的测试。

对于重点功能如复杂地形运动，我们加入了模拟的地形，对于软件算法做了初步验证，分析可行性后花费较少的时间成功的现实实现

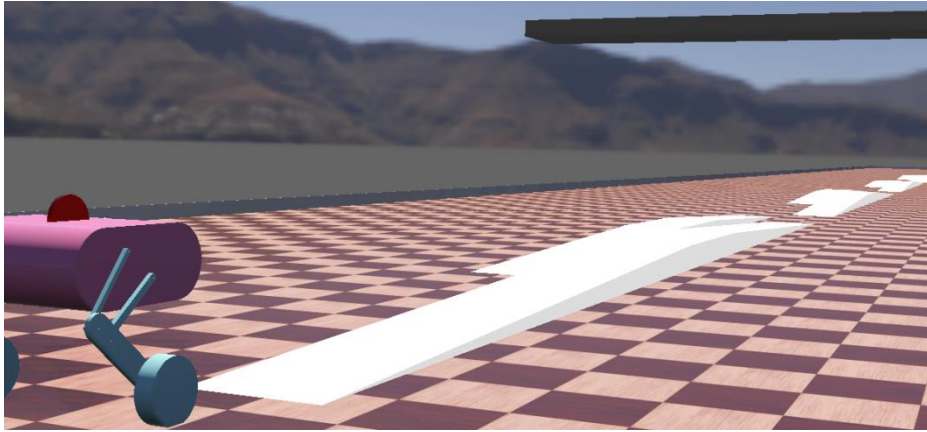


图 1.4.3.15 复杂地形软件验证

1.4.4 算法设计

1.4.4.1 功能介绍与 pipeline

(一) 辅瞄系统

本赛季我们的整体思路仍然是通过灯条特征的筛选来识别装甲板，通过 SVM 对数字进行分类，进行综合决策之后得到目标在图像中的角点位置。通过 PNP 算法并通过坐标系变换得到相对于子弹发射位置的装甲板位姿，然后通过 Kalman 滤波或当前统计模型进行位姿滤波，经过弹道补偿计算之后，得到云台的 Yaw 和 Pitch 角，最后将云台 Yaw 和 Pitch 角发送到下位机，由下位机完成对云台的控制。

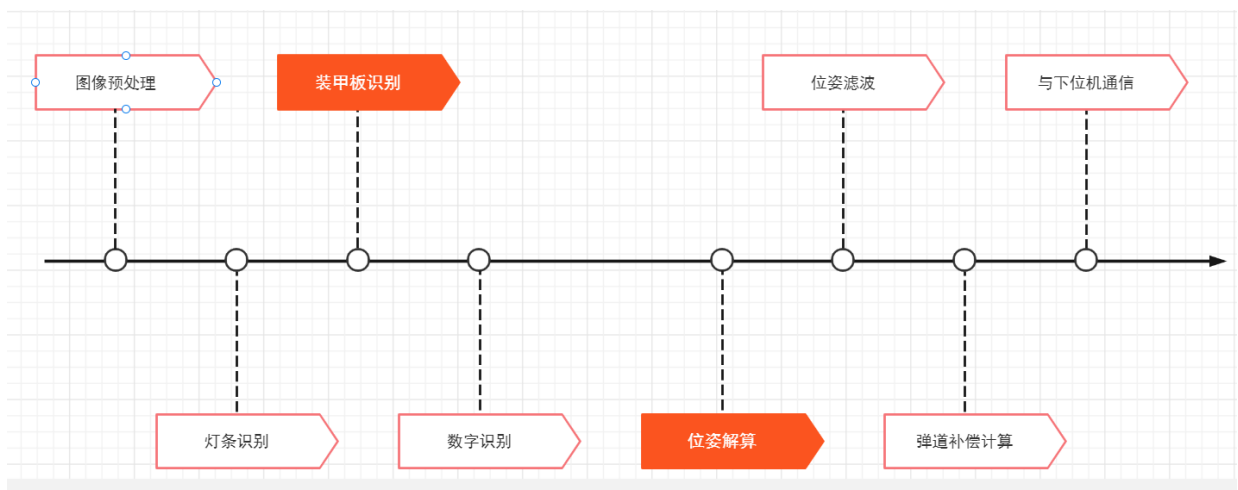


图 1.4.4.1 辅瞄算法流程图

（二）大符系统

大符系统的整体思路是先进进行图像预处理,做好形态学操作使识别更加稳定,对扇叶进行提取,并将进行过形态学操作后的扇叶 ROI 放进 SVM 分类器进行分类,得到目标击打的扇叶。同时,为了预测物体运动,需要对装甲板中心运动的圆轨迹进行空间拟合,并且如果判断目标是正弦运动的大符的话,需要拟合运动函数。为了云台的稳定性,可以对得到的位姿进行滤波,并利用已知的函数信息进行预测,最后进行弹道补偿计算,将得到的 Yaw, Pitch 角发给下位机,由下位机完成云台的控制。

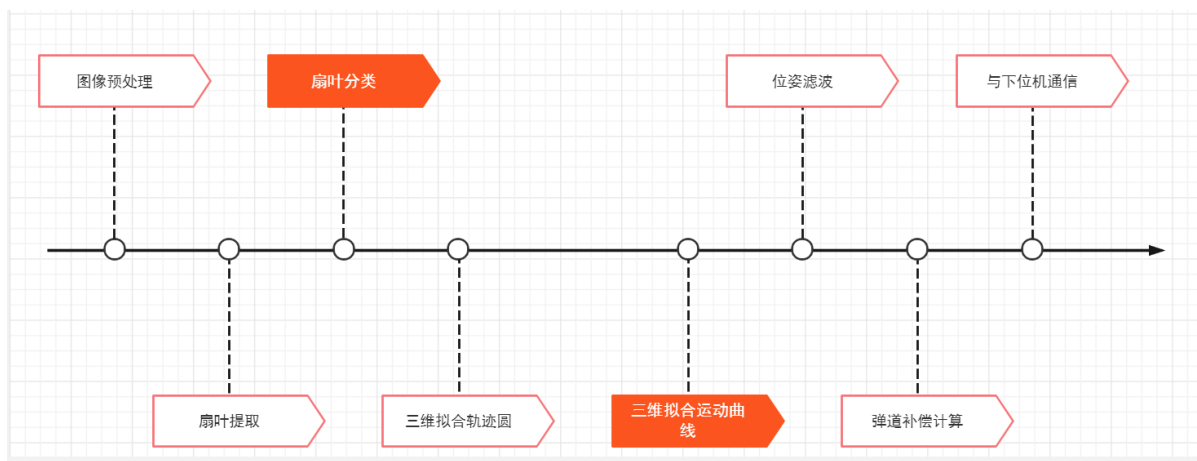


图 1.4.4.2 大符算法流程图

（三）多线程框架

利用多线程框架可以实现软件上的多个线程同时执行,通过多个线程并行执行,提高整体的运行性能。多线程与单线程运行不同之一在于不同线程之间使用线程资源可能会产生冲突,我们使用了无锁队列结合原子变量实现了线程互斥访问资源,保证了线程安全且线程之间等待资源时间几乎降为 0。

1.4.4.2 重要算法原理阐述、公式推导

（一）辅瞄系统

• 数字识别

数字识别是目标检测的最后一项工作,也是整个目标检测能体现鲁棒性的最重要一环。识别的主要流程如下:

①通过仿射变换将数字转到正面,由于仿射变换有很好的平行性和共线比例不变性,能有效地防止装甲板倾斜而导致数字的无关特征增加,导致分类器难以成功分类。

②提取数字 ROI,将得到的 ROI 部分转为灰度图。

③使用 OTSU 二值化方法进行阈值分割，得到分割较为完整的灰度图。使用 OTSU 进行分割的原因是最大类间方差法能有效地避免图像对比度和亮度对二值化的影响。

④最后将处理好的图像放进 SVM 分类器内，分类器将得到目标装甲板的数字。

• 位姿解算

根据装甲板四个角点在像平面坐标与装甲板实际尺寸，与预先标定得到的相机内参矩阵与畸变参数，通过 PnP 算法进行计算，最终得到装甲板中心在机器人坐标系下的三维位姿，完成位姿解算。由于我们战队的步兵相机安装在云台上，故如果需要得到云台控制需要的航向角（Yaw）、俯仰角（Pitch），需要进行一定的坐标系变换。

首先进行坐标系定义，将装甲板坐标系定义为 A 系，相机坐标系定义为 C 系，云台坐标系定义为 G 系，机器人坐标系定义为 R 系。

PNP 算法可以得到装甲板坐标系到相机坐标系的刚体变换矩阵，我们使用李群 $SE(3)$ 来表示，包含平移和旋转。根据相机在机器人的安装位置，我们可以得到相机系到云台系的刚体变换矩阵和云台系到机器人坐标系的刚体变换矩阵 T_{gr} ，进而有机器人坐标系下装甲板中心的三维坐标表达式如下：

$$r_r = T_{ar} * r_a = T_{gr} * T_{cg} * T_{ac} * r_a$$

其中， $r_a = [0,0,0]^T$ 。

• 卡尔曼滤波

为了对目标装甲板进行状态估计，需要对计算得到三维坐标信息提取一阶微分量，以实现装甲板的运动状态估计，故引入卡尔曼滤波。

卡尔曼滤波的主要流程由以下 5 个式子描述。

预测：

$$\hat{x}_{k-} = A_k \hat{x}_{k-1} + B_k u_k$$

$$P_{k-} = A_k P_{k-1} A_k^T + Q$$

更新：

$$K_k = \frac{P_{k-} H_k^T}{H_k P_{k-} H_k^T + R}$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-} + K_k (z_k - H_k \hat{x}_{k-})$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_{k-}$$

其中, $x_k = [x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}]^T$

状态转移矩阵

$$A_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & dt & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & dt & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & dt \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中 dt 为采样时间差

进行卡尔曼滤波之后, 得到后验估计 $\hat{x}_k = [\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \hat{\dot{x}}, \hat{\dot{y}}, \hat{\dot{z}}]^T$ 。那么对于预测时间 t_p 的预估装甲板位姿为

$$x_p = [\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}]^T + t_p * [\hat{\dot{x}}, \hat{\dot{y}}, \hat{\dot{z}}]^T$$

• 扩展卡尔曼滤波优化

我们原来的卡尔曼滤波模型将测量量设置为 x, y, z , 最后得到的状态估计量也为 x, y, z , 如果需要将坐标转化为云台控制需要的滚转角和偏航角, 需要经过以下的非线性变换

$$yaw = \text{atan2}\left(\frac{x}{y}\right)$$

$$pitch = \text{atan2}\left(\frac{z}{x^2 + y^2 + z^2}\right)$$

这样的话, 所得到的估计量 $yaw, pitch$ 高斯分布, 这样会使云台控制困难, 为了对此进行优化, 设计测量向量 $r_k = [yaw, pitch, distance]^T$, 其中

$$yaw = \text{atan2}\left(\frac{x}{y}\right)$$

$$pitch = \text{atan2}\left(\frac{z}{x^2 + y^2 + z^2}\right)$$

$$distance = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

定义测量矩阵为

$$H_k = \frac{\partial r_k}{\partial x_k}$$

即取其泰勒展开一阶项作为测量矩阵。

• CV 运动模型

CV 运动模型揭示了卡尔曼滤波中过程噪声之间的关联性，从而很好地将路程和速度关联起来

卡尔曼滤波地预测模型为

$$\hat{x}_{k^-} = A\hat{x}_{k-1} + B_k u_k + W(t)$$

将上述模型离散化,并且舍去控制变量 u_k 得

$$\hat{x}_{k^-} = A\hat{x}_{k-1} + I_k w_k$$

其中

$$I_k = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\Delta t^2 & 0 & 0 \\ \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}\Delta t^2 & 0 \\ 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}\Delta t^2 \\ 0 & 0 & \Delta t \end{bmatrix}$$

那么，过程噪声矩阵可以写为

$$Q_k = I_k Q'_k I_k$$

其中

$$Q'_k = \begin{bmatrix} q_x & 0 & 0 \\ 0 & q_y & 0 \\ 0 & 0 & q_z \end{bmatrix}$$

q_x, q_y, q_z 分别为 x,y,z 轴的过程噪声。至此，通过 CV 运动模型将过程噪声矩阵速度维度和位移维度结合起来，使参数调整更加方便。

• 卡方检验

为了准确判断目标装甲板是否进行了切换，引进卡方检验

定义残差为

$$e_k = z_k - H_k x_k$$

稳定滤波的场合下， e_k 应该符合均值为 0 的正态分布。我们设定双阈值 ϵ_1, ϵ_2 ,并且规定 $\epsilon_1 > \epsilon_2$

残差 e_k 方差为

$$D_k = E[e_k e_k^T] = H_k P_k^- H_k^T + R_k$$

定义检验数

$$r_k = e_k^T D_k^- e_k$$

如果 r_k 满足

$$\epsilon_2 < r_k < \epsilon_1$$

则说明装甲板可能处于非匀速状态，此时需要适当提高过程噪声，加快收敛。

如果 r_k 满足

$$r_k > \epsilon_1$$

则说明发生了装甲板切换，此时应该重启卡尔曼滤波估计器。

• 当前统计模型滤波

卡尔曼滤波虽然对运动目标有很好的跟踪能力，但是由于卡尔曼滤波只在物体线性运动时有较好的效果，当目标机动性较强时，卡尔曼滤波出现明显的滞后。为了对哨兵这种机动性更强的目标进行更加良好的预测，我们使用了对机动性目标跟踪更好的当前统计模型进行滤波处理。

当前统计模型的基本流程和 Kalman 滤波基本相同，我们使用的当前统计模型的状态估计量 $x_k = [x, \dot{x}, \ddot{x}, y, \dot{y}, \ddot{y}, z, \dot{z}, \ddot{z}]^T$ ，为了方便起见，下面仅讨论对 x 轴一个方向的处理方法，y, z 轴处理也同理。

状态转移矩阵

$$A_k = \begin{bmatrix} 1 & T & (\alpha T - 1 + e^{-\alpha T}/\alpha^2) \\ 0 & 1 & (1 - e^{-\alpha T})/\alpha \\ 0 & 0 & e^{-\alpha T} \end{bmatrix}$$

控制矩阵 $B_k = I$

控制向量

$$u_k = \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha} \left(-T + \frac{\alpha T^2}{2} + \frac{1 - e^{-\alpha T}}{\alpha} \right) \\ T - \frac{1 - e^{-\alpha T}}{\alpha} \\ 1 - e^{-\alpha T} \end{bmatrix}$$

在进行当前统计模型滤波之后，得到后验估计值 $x_k = [\hat{x}, \hat{\dot{x}}, \hat{\ddot{x}}, \hat{y}, \hat{\dot{y}}, \hat{\ddot{y}}, \hat{z}, \hat{\dot{z}}, \hat{\ddot{z}}]^T$

那么，对于预测时间 t_p 的预测值为

$$x_p = [\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}]^T + [\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}]^T * t_p + \left[\hat{x}, \hat{y}, \hat{z} \right]^T * \frac{t_p * t_p}{2}$$

• 弹道补偿建模

弹道补偿计算可以使用牛顿迭代法求解，基本的流程如图 1.4.4.3。

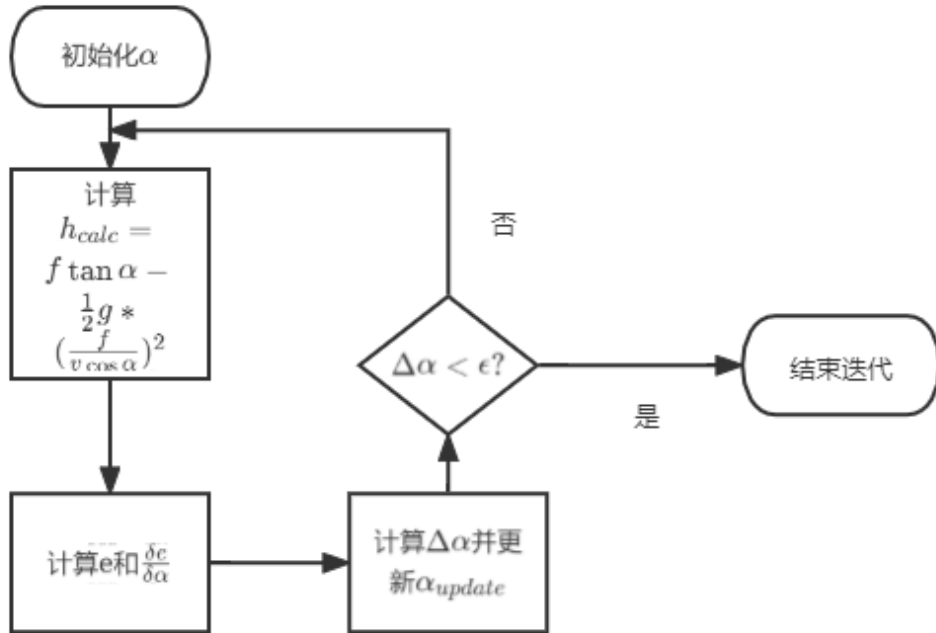


图 1.4.4.3 弹道补偿算法流程图

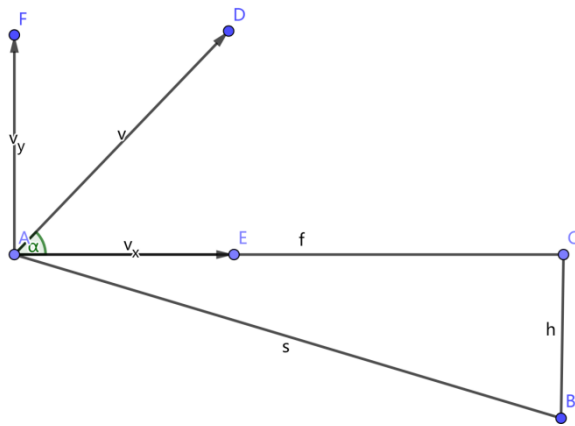


图 1.4.4.4 弹道补偿坐标系建模示意图

如图 1.4.4.4，我们假设子弹从 A 点出发，需要击打 B 点，在重力加速度和空气阻力的作用下，我们不可能使子弹的初速度直接指向 AB 方向，而是使子弹的发射方向偏离 AC 方向 α 角度，这样才能确保子弹能以优美的弧线直接击打中 B 点。弹道方程的核心便是求解 α 角。下面对弹道补偿计算进行建模。

首先对初速度 V 进行速度分解

$$\begin{cases} v_x = v \cos \alpha \\ v_y = v \sin \alpha \end{cases}$$

由于水平上不受力的作用(忽略了空气阻力), 故

- 飞行时间 $t = \frac{f}{v_x} = \frac{f}{v \cos \alpha}$ (f 为如图的水平距离)

- 子弹击打中的高度

$$h = v_y t - \frac{1}{2} g t^2 = v \sin \alpha * \frac{f}{v \cos \alpha} - \frac{1}{2} g * \left(\frac{f}{v \cos \alpha} \right)^2 = f \tan \alpha - \frac{1}{2} g * \left(\frac{f}{v \cos \alpha} \right)^2$$

求解: 先来分析已知条件以及目的参数, 我们已经计算得到了 B 点相对于 A 点的位置, 那么 h 和 f 已知, 有重力加速度已知, 目标是求解 α , 这容易得到 α 的解析式, 下面利用高斯牛顿法迭代求解 α 。

高斯牛顿法求解方程

- 首先构造残差函数

$$\|e\|^2 = \|h_{actual} - h_{calc}\|^2$$

- 其中 h_{actual} 为已知值, h_{calc} 是使用迭代法逐渐逼近的 h 值
- 我们的目标是

$$\min \|e\|^2 = \|h_{actual} - h_{calc}\|^2 = \|h_{actual} - f \tan \alpha + \frac{1}{2} g * \left(\frac{f}{v \cos \alpha} \right)^2\|^2$$

以此来达到使用计算机迭代逼近 h_{actual} 的目的

- 对误差函数 e 进行泰勒展开, 则:

$$e(\alpha + \Delta\alpha) = e(\alpha) + \frac{\delta e}{\delta \alpha} * \Delta\alpha$$

- 那么近似的误差函数可以写为(对内部进行泰勒展开并且将整个式子展开)

$$\|e(\alpha + \Delta\alpha)\|^2 = e^2 + 2e \frac{\delta e}{\delta \alpha} \Delta\alpha + \left(\frac{\delta e}{\delta \alpha} \right)^2 (\Delta\alpha)^2$$

- 对于这个方程, $e(\alpha + \Delta\alpha)$ 表示当 e 加上一个微小变量时 e 的变化幅度, 当 e 最小时, 有那么 $\frac{de(\alpha + \Delta\alpha)}{d\Delta\alpha} = 0$, 解得

$$\Delta\alpha = - \frac{e}{\frac{\delta e}{\delta \alpha}}$$

- $\Delta\theta$ 变化的方向是使误差函数趋于最小值的方向, 那么

$$\alpha_{update} = \alpha + \Delta\alpha$$

(二) 大符系统

• 三维圆拟合

通过 PNP 算法得到相对于机器人坐标系下装甲板中心点的三维坐标点，多个三维点可以拟合拟合大符的空间运动轨迹。

首先，要将三维点都尽量落在一个平面内，平面方程可以表示为

$$ax + by + cz - 1 = 0$$

写成矩阵形式有

$$MA = L_1$$

其中

$$M = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ y_1 & y_2 & \dots & y_n \\ z_1 & z_2 & \dots & z_n \end{bmatrix}^T$$

$$A = (a, b, c)^T$$

$$L_1 = (1, 1, \dots, 1)^T$$

求解这个方程，得到

$$A = (M^T M)^{-1} M^T L_1$$

这个便为平面的法向量

假设点都在圆上，那么点一定满足约束

$$M = \begin{bmatrix} \Delta x_{12} & \Delta x_{23} & \dots & \Delta x_{(n-1)n} \\ \Delta y_{12} & \Delta y_{23} & \dots & \Delta y_{(n-1)n} \\ \Delta z_{12} & \Delta z_{23} & \dots & \Delta z_{(n-1)n} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \dots \\ l_{n-1} \end{bmatrix}$$

其中

$$l_1 = \frac{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2}{2}$$

l_n 以此类推

令

$$B = \begin{bmatrix} \Delta x_{12} & \Delta x_{23} & \dots & \Delta x_{(n-1)n} \\ \Delta y_{12} & \Delta y_{23} & \dots & \Delta y_{(n-1)n} \\ \Delta z_{12} & \Delta z_{23} & \dots & \Delta z_{(n-1)n} \end{bmatrix}^T$$

$$C = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}$$

$$L_2 = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \dots \\ l_{n-1} \end{bmatrix}$$

求解平面方程和点方程，得

$$D = \begin{bmatrix} B^T B \\ A \end{bmatrix}$$

$$L_3 = \begin{bmatrix} B^T L_2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

则圆心坐标

$$C = (D^T D)^{-1} D^T L_3$$

半径可由以下公式来确定

$$r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}$$

算法采集大符运动过程得装甲板中心三维坐标点，将点集放进算法，求解得到空间轨迹圆方程，以此方程为基础进行预测。

• 速度估计

为了得到大符转动的旋转速度，可使用差分滤波器对实际观测到的角度进行处理，但由于观测噪声很大，还需要使用低通滤波器对得到的差分滤波器输出进行处理。为了方便起见，我们直接使用了匀速 CV 模型对角度进行差分并且滤波，同时注意将测量噪声调小以减小相位滞后，得到一段时间的速度之后可以进行运动速度曲线拟合。

• 运动曲线拟合

如果判断需要击打的是正弦波类型的大符，需要对运动函数进行拟合才能得到大符正确的速度曲线

算法使用 Ceres 库为非线性优化库，设定四个未知参数，分别为角速度，初相位，幅值和偏移量，构造残差函数，通过 Ceres 库对参数进行约束，利用最小二乘法进行最小残差求解，残差函数使用柯西残差函数加强对异常数据的鲁棒性。

（三）多线程框架

考虑到我们战队使用的上位机 TX2 为四核八线程，综合考虑线程切换开销以及多线程并行加速，程序应该设计为 $8/2=4$ 个线程左右为宜。经过测试，三个线程和四个线程实际速度并无明显差异。为了线程之间的专职性，设计了如图 1.4.4.5 的多线程框架。

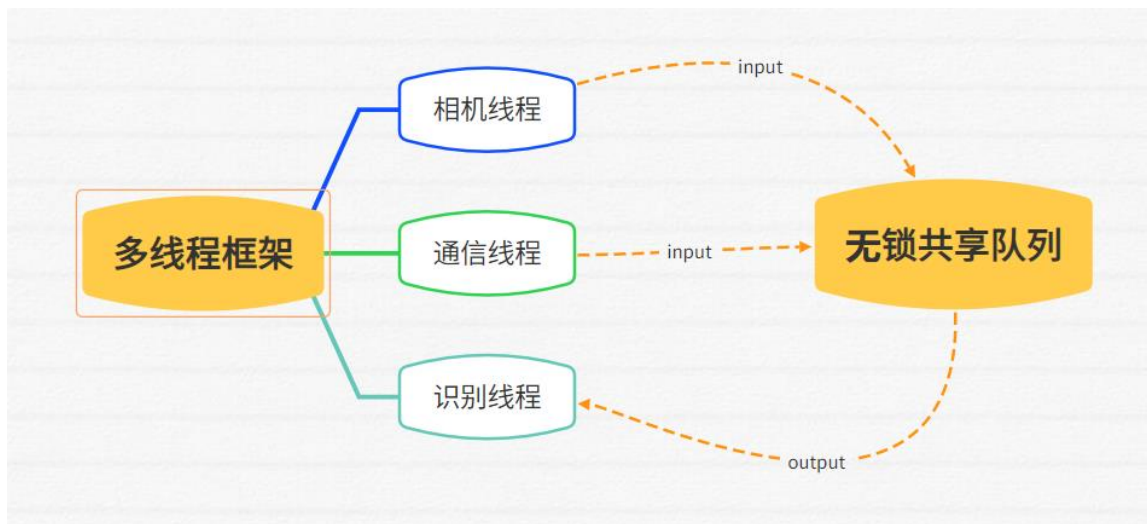


图 1.4.4.5 多线程框架图

1.4.4.3 算法性能、优缺点分析、优化方案

（一）辅瞄系统

算法性能：

该套辅瞄系统在 NVIDIA TX2 上运行帧率可以达到 130 帧，数字识别耗时在 1ms 以内，满足实时性要求。

优点：

- ①数字识别在各种灯照条件下测试，并且对数据集进行数据增强，识别的鲁棒性得到保证。
- ②使用卡尔曼滤波和当前统计模型两种策略进行滤波，对于普通的目标使用卡尔曼滤波，对于机动性较强的目标如哨兵使用当前统计模型，能够很好地跟踪并且对装甲板进行运动估计。

缺点：

- ①使用传统视觉对光照条件依赖很高，需要根据场地光照条件调整相机曝光，不能做到开箱即用。

②当前统计模型在目标机动性与设定参数不一致地情况下极难收敛，需要花费很多的时间进行调参。

（二）大符系统

算法性能：

该算法运行在 NVIDIA TX2 上处理帧率可以达到 150 帧，拟合空间轨迹圆和拟合运动曲线花费时间都在 3ms 以内。

优点：

该算法处理速度较快，三维拟合轨迹如果采集数据足够的话比较稳定，非线性优化求解运动曲线代码简单。

缺点：

收敛较慢，稳定收敛可能需要 2s 左右，且受陀螺仪漂移影响很大，对拟合精度要求很高。

（三）多线程框架

算法性能：

使用无锁共享队列，使线程之间数据交换的数据降至 0.001ms。识别线程如果得不到新的数据，会及时交出时间片给相机线程和通信线程，提高了 CPU 的利用率。

优点：

数据共享传输时间短，CPU 利用率较高，有效地避免了数据竞争以及数据冲突问题，保证了线程安全。

缺点：

线程之间的处理时间如果差异过大的话会导致线程同步难以实现，需要调整每个线程的延时时间达到一定程度的同步，可移植性较差。

1.4.4.4 算法库介绍与接口说明

无锁共享队列基于 C++标准库 `atomic` 开发,多线程管理使用 C++标准库 `thread` 开发。具体接口如下表 1.4.4.1 所示。

表 1.4.4.1 多线程框架接口名称及功能表

重要函数	功能
Push	写入数据
Pop	读取最新的数据, 即正在写入数据的前一个数据

1.4.4.5 算法结果

(一) 辅瞄系统

图 1.4.4.6 是使用 OTSU 最大间方差算法自动阈值分割的图像, 在考虑噪声的前提之下仍然能完整分割。



图 1.4.4.6 数字二值化分割图

图 1.4.4.7 是数字分类后目标决策图。图中间为带数字的装甲板, 可以看到即便是在低曝光的情况之下, 仍然能稳定识别。

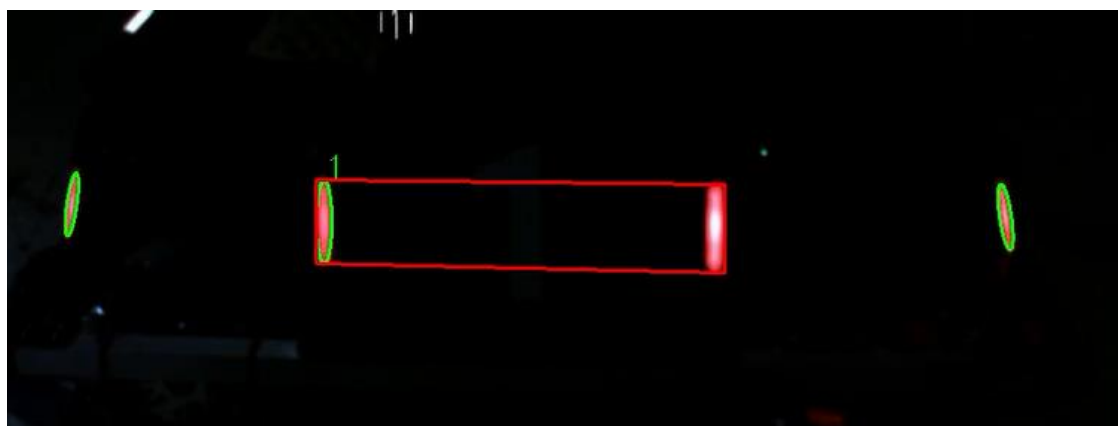


图 1.4.4.7 数字分类后目标决策图

如图 1.4.4.8 普通卡尔曼滤波在跟踪非线性运动时有明显的滞后; 而可以看到在图 1.4.4.9 中, 当前统计模型在跟踪非线性模型仍能较好地跟踪目标。

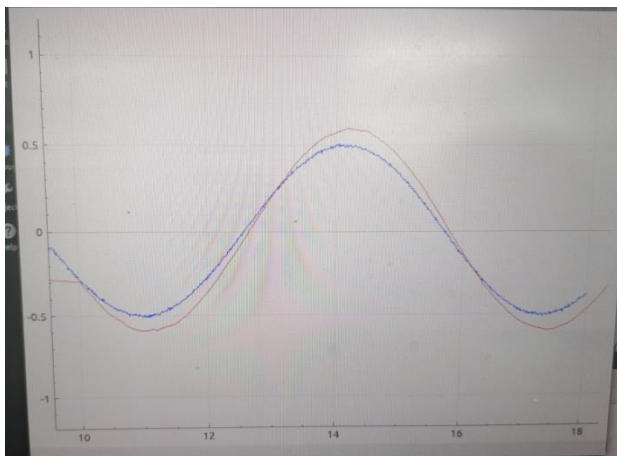


图 1.4.4.8 卡尔曼滤波跟踪非线性轨迹图

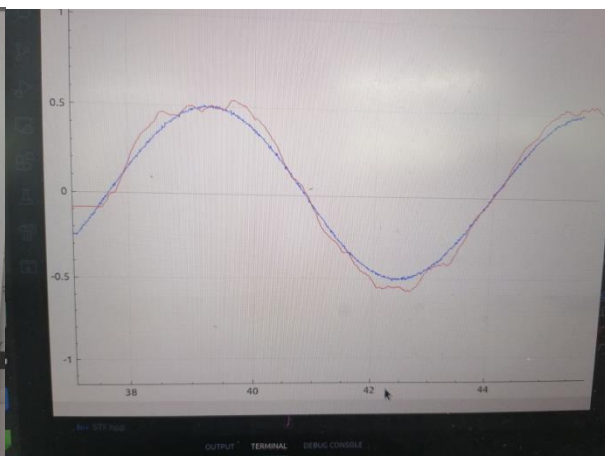


图 1.4.4.9 当前统计模型跟踪非线性轨迹图

(二) 击打能量机系统

大符识别效果如下图 1.4.4.10 所示，1-4 标号表示了点地对应顺序，代码同时识别到了圆心 R。



图 1.4.4.10 大符识别效果图

如下图 1.4.4.11 在大符为正弦转动时实时采集数据和拟合数据比较，其中橙色曲线为拟合数据，蓝色曲线为实际数据。

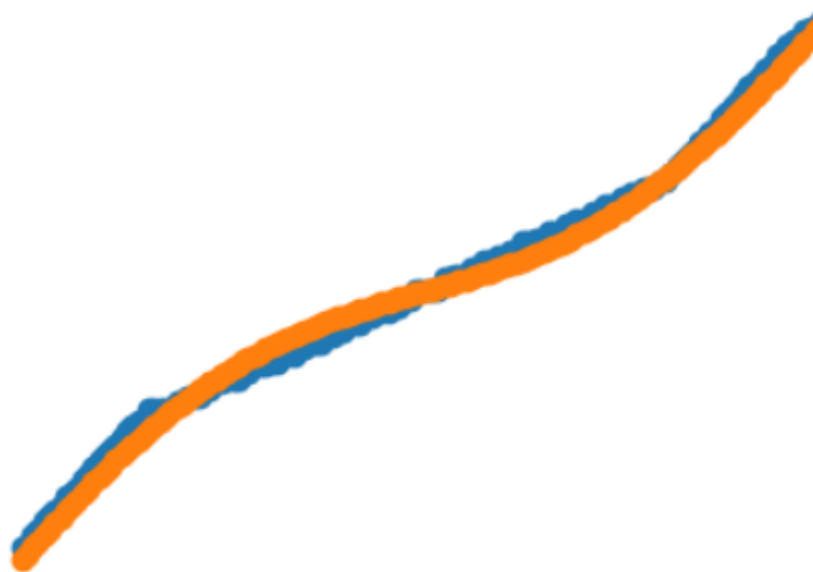


图 1.4.4.11 运动方程拟合效果图

1.5 研发迭代过程（10）

表 1.5.1 步兵机器人版本迭代过程记录表

版本号或阶段	功能或性能详细说明	完成时间
V1.0	基于气缸的自适应悬挂底盘。测试轮组的行程及气缸密闭性。	2022.10.7
V2.0	采用独立悬挂结构的舵轮底盘，pitch 轴采用连杆结构传动的上供弹云台。测试舵轮底盘运动解算与控制；测试 yaw 轴、pitch 轴响应；测试在功率限制情况下整车的运动情况。	2021.12.30
v3.0	基于连杆和弹簧的自适应悬挂底盘。测试弹簧的精度系数及轮组的行程。	2022.3.10
v4.0	基于连杆和弹簧的自适应悬挂底盘，同时采用新型的内嵌轮组的麦轮结构，云台采用 pitch 轴直连，使用滑槽供弹的半下供弹云台	2022.4.1

v4.1	在 v4.0 的基础上，在半下供弹的云台 pitch 上加入重力补偿结构，使云台 pitch 轴在任意倾角下，皆可以实现机械稳定平衡	2022.4.8
平衡步兵 v1.0	采用简单两轮式结构，使用 3508 电机驱动轮组，悬挂采用两轮独立悬挂。	2021.9.20
平衡步兵 v2.0	采用轮腿式结构，加入三连杆的结构，实现平衡步兵机器人的“腿部”伸缩。	2022.1.14
平衡步兵 v1.1	简单两轮式步兵，换用减速箱为 1:27 减速比的 3508 电机驱动轮组，优化底盘布局	2022.3.30
平衡步兵 v2.1	采用轮腿式结构，修改机器人腿部旋转副的连接方式，更改轮毂电机型号，调制机器人重心位置	2022.4.15
独立悬挂 v1.0	基于四连杆结构的独立悬挂底盘，省去了自适应每个轮组相互关联的结构。测试了飞坡的稳定性问题，观察飞坡的姿态	2022.05.20
V5.0	基于连杆和弹簧的自适应悬挂底盘，将连杆自适应底盘的轮距缩小，测试飞坡的姿态以及动力传输的问题。	2022.07.01
全向轮 v1.0	采用独立悬挂式避震的底盘，选用自制碳板全向轮以减轻重量，测试对于崎岖路面前进时云台的稳定程度以及飞坡的姿态。	2022.07.10

1.5.1 重点问题解决记录

表 1.5.1.1 步兵机器人重点问题记录表

序号	问题描述	问题产生原因	问题解决方案&实际解决效果	机器人版本号或阶段	解决人员
1	步兵以 25m/s 的速度发射 100 发弹丸, 会出现 10 发左右弹丸偏离弹道 $15^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 。	使用的摩擦轮电机不是同一批次, 导致在控制相同参数下, 左右两侧电机转速差值过大	保证同一辆步兵上使用同一批次的摩擦轮电机	V1.0	机械工程师: 覃紫航
2	步兵在速度 60w 及以上功率的条件下起步, 无法直线运动, 会出现大于 30° 的倾斜	原功率限制算法会依次采用削减速度和削减电流的方法来限制功率, 但是由于启停以及加减速时会有瞬间大功率, 电流与电机转速并非线性关系, 故而此时会使四个轮子的速度无法达到期望值从而失衡, 长时间无法走直线	通过对期望速度进行更多次变系数平滑衰减而非直接对输出电流控制, 同时再针对闭环输出小范围补偿。最终可以完美直线运动全方位运动	V3.0	嵌入式软件工程师: 戴军
3	步兵半下供弹版云台 Pitch 轴响应时间为上一版云台的一倍, 且长时间工作后, pitch 轴电机温度高	云台重心分布不均, 重量过于集中于测速模块一侧	加入重力补偿机构, 使得云台 Pitch 轴电机响应时间减少一半	V4.0	机械工程师: 王超

4	步兵飞坡失败。步兵在前轮离开坡面后快速前倾导致最终倾倒	前轮腾空后，前轮突然加速旋转，带动悬挂系统向前切斜，进而导致整个机器人向前倾斜	控制时步兵机器人前轮腾空时不旋转。步兵能够平稳飞坡。	V4.1	嵌入式软件工程师：戴军
---	-----------------------------	---	----------------------------	------	-------------

1.6 团队成员贡献 (2.5)

表 1.6.1.1 步兵机器人团队成员贡献表

姓名	基本信息 (专业、年级、队内角色)	主要负责工作内容描述	贡献度 (所有成员贡献度合计为 100%)
张瑞杰	电子信息工程、大三、项目组长，平衡步兵机械负责人	协调组内成员进度，督促研发任务计划的制定，监督任务完成情况；设计平衡步兵的机械结构	12.5%
覃紫航	电子信息类、大二、步兵机械组成员	负责步兵云台及舵轮底盘的设计	12.5%
牛天泽	电子信息类、大二、步兵机械组成员	负责步兵底盘及悬挂系统的设计	12.5%
王超	机械设计制造及自动化，大二，步兵机械组成员	负责步兵发射机构的设计与调试，设计云台的重力补偿机构	12.5%
陈坚	光电信息科学与工程，大三，步兵硬件负责人	负责步兵组的硬件开发、布局布线及日常维护调试	12.5%
郭嘉豪	电子信息工程、大二、平衡步兵嵌入式软件负责人	负责整个平衡步兵机器人的嵌入式开发，包括底盘控制、云台控制等	12.5%
戴军	集成电路工程、大二、平衡步兵嵌入式软件负责人	负责整个普通步兵机器人的嵌入式开发，包括底盘控制、云台控制等	12.5%
周倍进	自动化，大二，步兵组算法负责人	视觉系统的嵌入式环境开发	12.5%

1.7 参考文献（2.5）

表 1.7.1.1 步兵机器人参考文献表

参考文献	收获点分析
《实用开关电源设计》	学习了不同类型的开关电源理论
《调试九法》	学习了软硬件的基本调试方法
https://www.ti.com.cn/cn/lit/pdf/zhca041	学习开关电源的升压降压电路
https://www.ti.com.cn/cn/lit/pdf/zhct286	学习开关电源降压电路 PCB 布局
https://www.ti.com.cn/cn/lit/pdf/zhct014	学习电源管理，DC/DC,AC/DC
https://www.monolithicpower.cn/cn/documentview/productdocument/index/version/2/document_type/Datasheet/lang/cn/sku/MP2451/document_id/4072/	学习 MP2451 芯片使用
https://www.monolithicpower.cn/cn/documentview/productdocument/index/version/2/document_type/Datasheet/lang/en/sku/MP2482/document_id/265/	学习 MP2482 芯片使用
https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/CP2102-9.pdf	学习 CP2102 芯片使用
https://www.ti.com/document-viewer/BQ24640/datasheet	学习 BQ24640 芯片使用
https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX3051.pdf	学习 MAX3051 芯片使用
https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/1473fas.pdf	学习 LTC1473 芯片使用
https://assets.maxlinear.com/web/documents/spx3819.pdf	学习 SPX3819 芯片使用

http://3cfeqx1hf82y3xcoull08ihx-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2020/11/DS-000176-ICM-20602-v1.1.pdf	学习 ICM20602 传感器使用
https://bbs.robomaster.com/forum.php?mod=viewthread&tid=11054	学习云台架机械结构设计
https://blog.csdn.net/qq_37335362/category_11088393.html	学习轮足式的机械结构与控制理论
https://www.guyuehome.com/author/%E7%86%8A%E7%8C%AB%E9%A3%9E%E5%A4%A9	学习 Webots 仿真软件的使用
https://bbs.robomaster.com/forum.php?mod=viewthread&tid=9407&fromuid=39845	获取裁判系统相关机械 3D 模型
https://bbs.robomaster.com/thread-8853-1-1.html	学习陀螺仪选型及使用注意事项
https://bbs.robomaster.com/thread-7807-1-1.html	学习超级电容相关知识
https://zhuanlan.zhihu.com/p/368059247	学习基本相机知识
https://zhuanlan.zhihu.com/p/366725718	学习坐标系变换基础
http://ceres-solver.org/tutorial.html	ceres-solver 库的基础使用
https://www.guyuehome.com/18237	KF,EKF 的使用
https://zhuanlan.zhihu.com/p/59684549	大符击打思路
Ngo H Q T, Nguyen T P, Huynh V N S, et al. Experimental Comparison of Complementary Filter and Kalman Filter Design for Low-cost Sensor in Quadcopter[C]//Proceedings of the International Conference on System Science and Engineering, 2017: 488-493	学习 IMU 的数据的解算

2. 哨兵机器人

2.1 其他学校哨兵机器人分析综述（5）

有效运动和精准打击是围绕哨兵机器人设计的核心问题。为此，哈尔滨工业大学设计的哨兵机器人具有重量轻、提速快、气弹簧变相、小弹丸中心供弹链路稳定的特点，最高速度达到 2.3m/s，具有十一米的稳定弹道，在力求结构简单的前提下实现了能跑能打的功能。大连交通大学设计的哨兵机器人采用了下云台半下供弹、上云台步兵头的结构，供弹链路稳定，云台配平，底盘上加入了弹簧撞柱模块，储能变向，速度能到 1.6m/s，快拆上采用弹簧搭扣，力求短时间拆和装，兼备了刚度大和重量轻的特点。上海交通大学的哨兵机器人则是加入了自研的弹射机构，通过 2006 电机灵活变向，减小变向过程中所需的时间。可以看出，哨兵机器人的战术地位不止于移动躲避，而是在此的基础上实现有效范围内的精准打击，能够给敌人带来伤害，这也是我们哨兵组新赛季工作的核心。

2.2 机器人功能定义（10）

表 2.2.1 哨兵机器人功能定义表

哨兵	功能需求	需求分析/量化指标
底盘	快速随机运动	快速在轨道上做无规则运动以躲避敌方攻击
	快拆结构优化	实现快速安装拆卸于轨道，节省上场所需时间，方便调试
	强度高，结构稳定	多次撞柱变相后底盘结构不被破坏，保持正常运动
	弹簧储能、红外变向	利用红外控制撞柱后变向的时间，充分利用弹簧存储的能量
云台	轻量化设计	提高云台响应速度及稳定性
	云台重心稳定	保证辅瞄下能够快速移动到目标所在处
	绕 yaw 轴 360° 转动	实现 360° 无死角巡视打击
	双云台协同作战	集中火力攻击一个敌人，达到快速击杀的目的
武器系统	射击系统稳定	不出现卡弹，500 发子弹测试 20 次无卡弹现象

	射速稳定	摩擦轮回速快，以保证弹道的稳定
	具备辅助瞄准功能	辅助提高瞄准精度，5米打击小装甲板精度 100%
交互部分	机器人间通信	通过雷达判断敌人位置，并借助无人机手指令进行打击
其他	重要线路稳定	连续高速撞击轨道下不会出现线路的问题
	反小陀螺辅瞄功能	反制敌方小陀螺，在 5 秒内可击杀敌方小陀螺 1 级步兵

2.3 机器人核心参数 (5)

表 2.3.1 哨兵机器人功能定义表

参数	描述
重量	14.5kg
尺寸 (长宽高)	430mm×405mm×630mm
重心高度	轨道上表面 30mm
最大工作电压	24V 供电，稳定在 23.9±0.1V 工作
电机数目与用途	GM6020×4: 云台 Pitch 与 Yaw 轴驱动 RM2006×6: 双云台摩擦轮和拨弹 M3508×1: 底盘驱动
车体最大移动速度	2.2m/s @30w
传感器类型	2 个行程开关+2 个红传感器
电路设计	2×STM32F405、1×STM32F105

2.4 设计方案（50）

2.4.1 机械结构设计

2.4.1.1 机械结构设计框图

哨兵机器人机械结构设计框图如下图 2.4.1.1 所示。

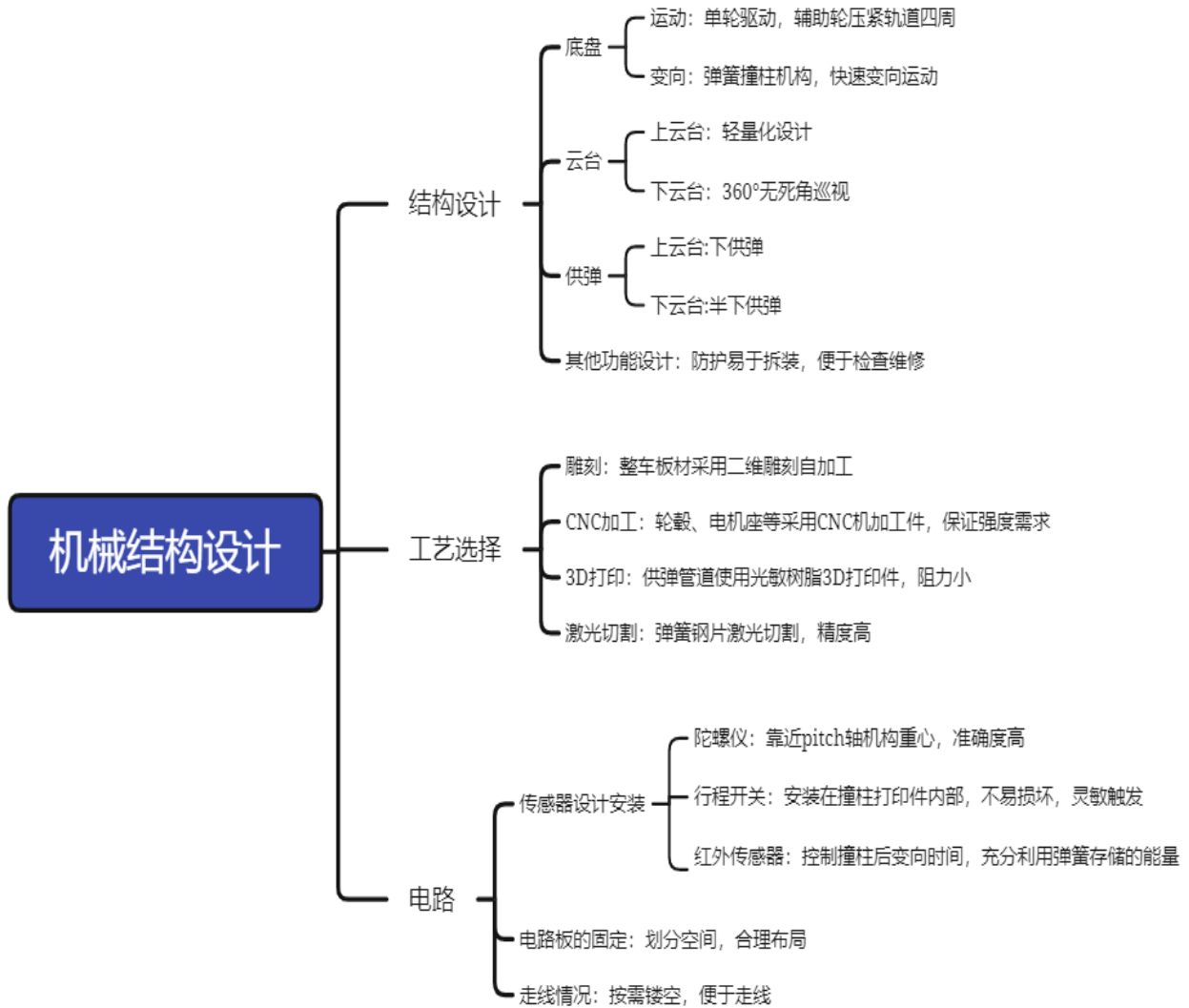


图 2.4.1.1 机械结构设计图

2.4.1.2 整体设计方案

哨兵整体方案采用底盘+双云台设计，上下云台相互独立、密切配合。具体结构设计分析如下：

底盘：底盘使用 3508 电机加包胶轮进行驱动，本赛季对主动轮进行了优化，采用联轴器与轮毂一体化设计，提高电机轴与包胶轮轴线的同轴度，从而减小了偏心导致的功率损耗

及对电机轴的损伤；底盘装有从动轮夹紧轨道四周，从而确保运动的稳定性，压紧方式由原来的螺钉+弹簧改为弹簧钢片，可有效防止轮子的左右歪斜并缩短底盘尺寸；增加弹簧撞柱变向机构，实现哨兵在运动时的快速变向；底盘主框架采用 20x15x1mm 及 15x15x1mm 铝管构建，在保证结构强度的基础上实现整体减重，以提高底盘运动速度。

云台：采用上下双云台设计，上云台采用下供弹方案，实现云台的轻量化，以提高云台响应速度及稳定性，同时精减供弹链路，减少子弹堆积，从而减小阻力，有效防止卡弹；下云台 yaw 轴处安装滑环，可实现云台 360°无死角巡视，对于 pitch 轴机构，使用 B 板和 nuc 放置 pitch 轴后方来实现配重，使得重心更加靠近 pitch 轴，大大提高了 pitch 轴响应速度及稳定性。

供弹系统：上云台采用下供弹方案，实现云台轻量化以提高响应速度，供弹链路最大程度精减，减少弯道数量，以减小卡弹几率；下云台采用半下供弹方案，将弹舱和发射机构左右放置，将供弹链路的长度大幅缩减，能够有效做到不卡弹，提高稳定性；改用半下供弹后结构设计更加合理精巧，大大提高了空间利用率，同时有效减轻了下云台的重量。

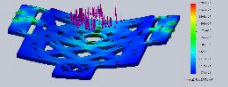
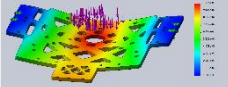
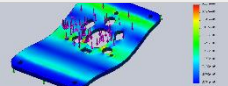
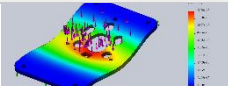
发射机构：使用与上赛季相比硬度更大的摩擦轮包胶，有效防止包胶开裂，提高耐久度，同时换用 17mm 厚度的包胶，减小子弹的左右散度，提高了子弹的命中率；使用塞打螺丝对发射机构摩擦管、枪管进行定位，提高安装精度，进而提高子弹命中率。

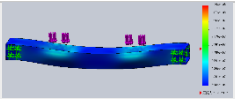
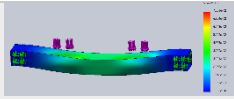
此外，在进行整体设计的时候，我们充分地考虑到了电路布线的需求，合理规划布局，留出足够的空间固定电路板，并按需设计板材镂空，方便电路走线；在防护设计层面，我们具体分析了各处被子弹打击的可能性，按实际需求做出对应强度的防护，同时，防护便于拆装，有利于整车的检查与维修。

2.4.1.3 核心零件的有限元分析、静动力学分析

特别地，在设计过程中，对于重要承重零件，我们进行了应力分析，以确保零件的变形程度在许可挠度范围内。如下表 2.4.2 所示：

表 2.4.2 哨兵机器人重要承重零件应力分析表

零部件名称	受力情况说明	应力图像	位移图像	结果分析
下云台 yaw 轴电机固定板	承载整个半下供弹下云台的重量，此处对其施加 80N 的力			最大形变处位移为 0.1mm，满足刚度要求
上云台 yaw 轴电机固定板	承载整个下供弹上云台的重量，			最大形变处位移为 0.007mm，满足刚度要求

	此处对其施加 50N 的力			
底盘快拆搭扣安装铝管	搭载整个半下供弹下云台的重量，此处对其施加 80N 的力			最大形变处位移为 0.08mm, 满足刚度要求

最后,按照不同功能的零件的性能需求,我们采用了合适的工艺制作零件,进而装配整车,如下表 2.4.3 所示:

表 2.4.3 哨兵机器人加工工艺应用表

加工工艺	材料选择	应用
2D 雕刻	环氧树脂、玻璃纤维	整车板材
3D 打印	光敏树脂、PLA、尼龙	拨盘、供弹管道、辅助轮安装座、撞柱打印件
CNC 加工	6061 铝合金	联轴器、电机座、主动轮轮毂、摩擦管、枪管
激光切割	弹簧钢	辅助轮安装板

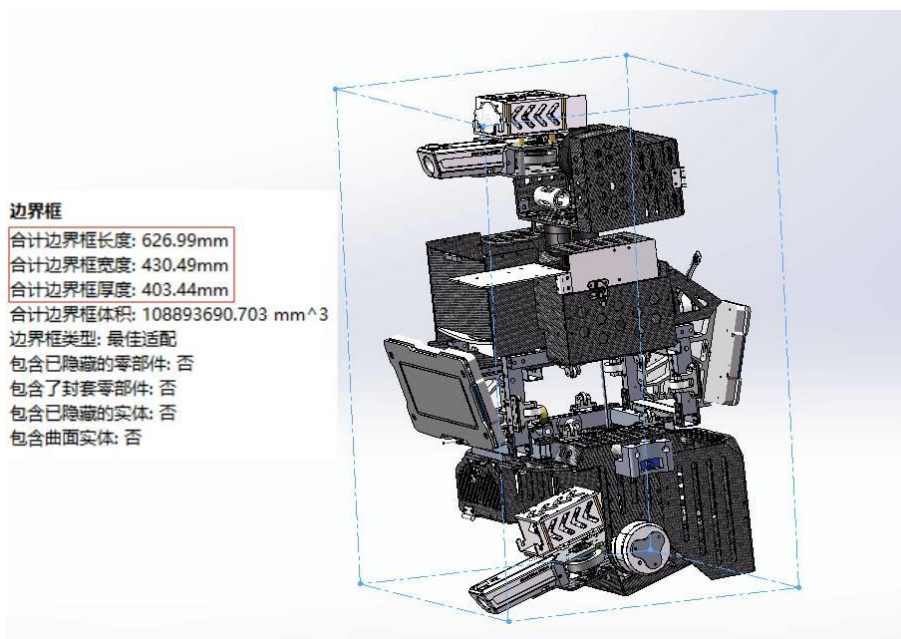


图 2.4.1 哨兵尺寸图

2.4.2 硬件设计

2.4.2.1 整机硬件框图

哨兵机器人底盘与上下云台硬件框图 2.4.2 如下图所示：

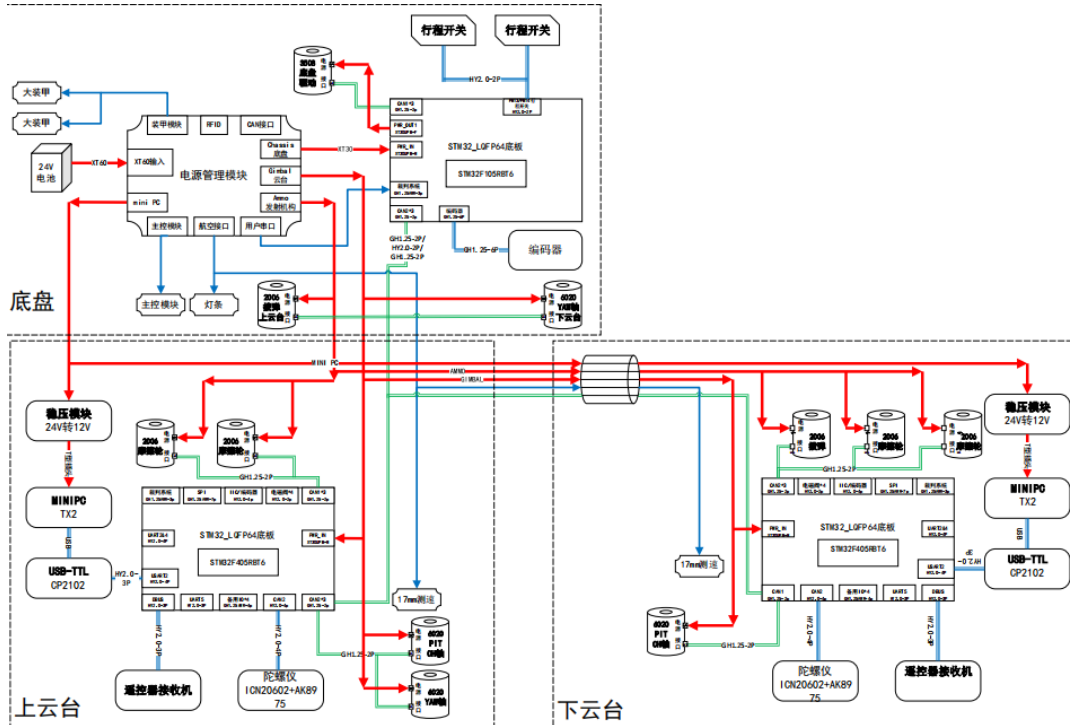


图 2.4.2 哨兵机器人硬件电路图

2.4.2.2 硬件详细设计

哨兵硬件系统分为三个部分，上下云台以及底盘。每个部分都装配有对应的裁判系统。具体结构如下：

底盘：底盘控制中枢是团队自主设计的功率检测板，由 STM32F105 芯片作为主控，控制底盘的 3508 电机、红外测距模块、行程开关、编码器等外设，通过 CAN 总线与上下云台硬件系统进行通信。此外，板载的功率计 INA260 可以实时读取底盘板电压电流，从而实现底盘功率检测的功能。底盘上安装有裁判系统，包括电源管理模块、主控模块、装甲板模块和灯条模块等等，其中电源管理模块作为电源中枢将电分配给底盘、云台、发射机构以及其他裁判系统模块。

上云台：上云台采用以 STM32F405 为主控的控制板，对其他外设进行控制或通信。上云台拥有视觉模块 TX2 进行瞄准与识别，STM32F405 主控板通过串口与视觉模块进行通信。PITCH 轴和 YAW 轴电机结合陀螺仪的实时数据对上云台的角度进行闭环控制。上云台拥有完整的发射机构，包括拨弹电机和摩擦轮，都是由 STM32F405 主控板通过 CAN 接口对其进行控制。上云台安装了裁判系统中的测速模块，对弹丸进行测速。

下云台：下云台和上云台硬件结构采用对称的设计思路以方便维修，视觉模块、PITCH轴电机、YAW轴电机、陀螺仪、发射机构、测速模块等可参考上云台部分。不同的是，下云台与底盘的连接部分安装了滑环，滑环连接了底盘到下云台的电源线、通信线等，使线路布置更加有序，而未安装滑环的上云台布线就存在一定困难且较为杂乱。

2.4.2.3 关键器件的选型

哨兵电路的关键器件选型如下表所示：

表 2.4.4 哨兵机器人关键器件选型表

器件类型	选型
主控芯片	STM32F105RBT6、STM32F405RGT6、STM32F042F6P6;
24V 转 5V 稳压	MP2482、MP2451
5V 转 3V3 LDO	SPX3819M5-3.3L
TVS	SMBJ24A, SMAJ26A
USB 转串口芯片	CP2102
CAN 收发器	TCAN33x, TJA1050
功率检测芯片	INA260
陀螺仪	ICM20602, QMC5883L
晶振	8MHZ, 3225/5032 封装
二极管	IN5819, 1N4007, 1N4148, SS54

2.4.3 软件设计

2.4.3.1 软件设计图

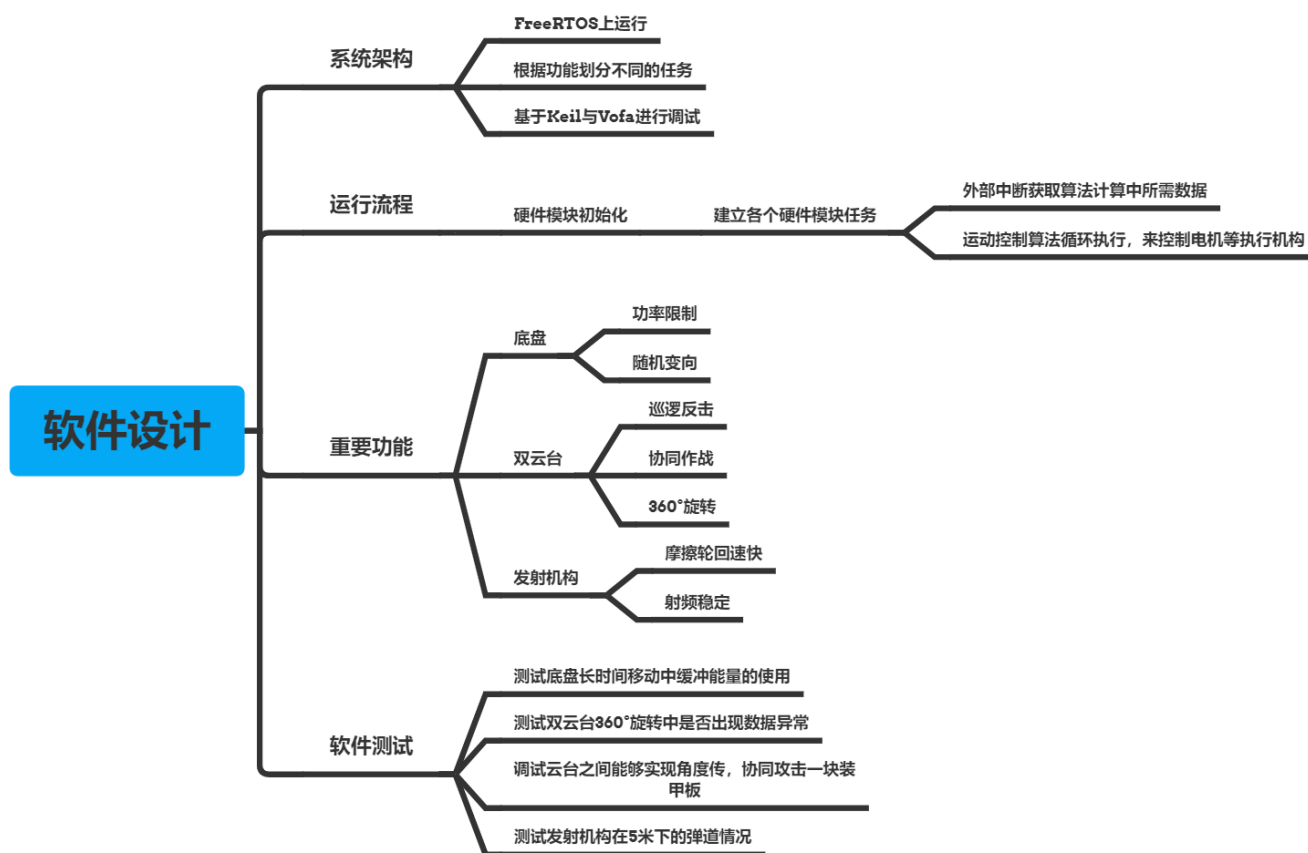


图 2.4.3 哨兵机器人软件设计图

2.4.3.2 软件方案描述

在嵌入式软件设计中，我们依托于 FreeRTOS 运行各个功能模块，实现了较为高效地 CPU 资源的利用，同时为了方便调试，我们结合有线和无线两种方式，借助 keil 和 vofa 两大软件，有线观测云台角度的变化是否符合要求，无线调试底盘运动中功率的变化和缓冲能量的使用率。

运行流程上,首先进行各个硬件模块的初始化，如 CAN 通信、USART 通信、编码器采集、行程开关与红外传感配置等，之后我们将所要实现的功能划分成不同的任务，包括了对云台、底盘电机的控制任务、传感器数据的采集任务、发射机构的控制任务和掉线检测任务，各个任务之间通过 FreeRTOS 优先级调度的机制循环运行。同时，借助 CAN 通信、串口通信等外部中断获取到实时有效的数据，各个任务将获取到的数据更新于控制算法中，并最后输出给到电机等执行机构，实现整个系统的闭环控制。

重要功能部分,根据机械上设计的双云台加底盘系统和规则约束,我们在底盘上实现了有效的功率限制算法和哨兵在轨道上的随机变向,在云台上实现了两轴电机的360°旋转打击和协同作战,以图在最短时间内击杀敌人。底盘的功率限制部分主要采用了功率环算法,结合每一时刻的功率情况和缓冲能量的剩余量设置合理的功率上限,对发送给电机的电流进行控制性放大和缩小,以达到更快的速度。同时,为了更好地躲避打击,我们加入随机算法控制哨兵在轨道上的方向,达到灵活变向的目的。在双云台上,相比于简单的巡逻打击,我们加入了协同作战部分,上下云台能够相互配合、互传敌人方位以实现更为有效的打击,同时结合了机器人通信的特点,利用雷达的数据进一步决策更快找到敌人的位置。

设计与检测并行,为了达到预期的设计目标,我们在软件上针对不同的机械结构进行了细分的测试并量化了对应的目标。首先在底盘部分,我们预期缓冲能量的剩余量能够达到30J,并通过修改功率环的参数最终达到长时间不因超功率扣血且缓冲能量利用率处于较高的水平。其次,在双云台的软件测试上,我们通过不断改变目标装甲板的位置,且实时观测双云台的角度变化与视觉的识别情况来确保双云台能够在短时间内识别上相同的装甲板。加入了云台协同后,相比于独立的识别巡逻反击,打击的效率有效提高。

2.4.4 算法设计

2.4.4.1 算法设计流程框图

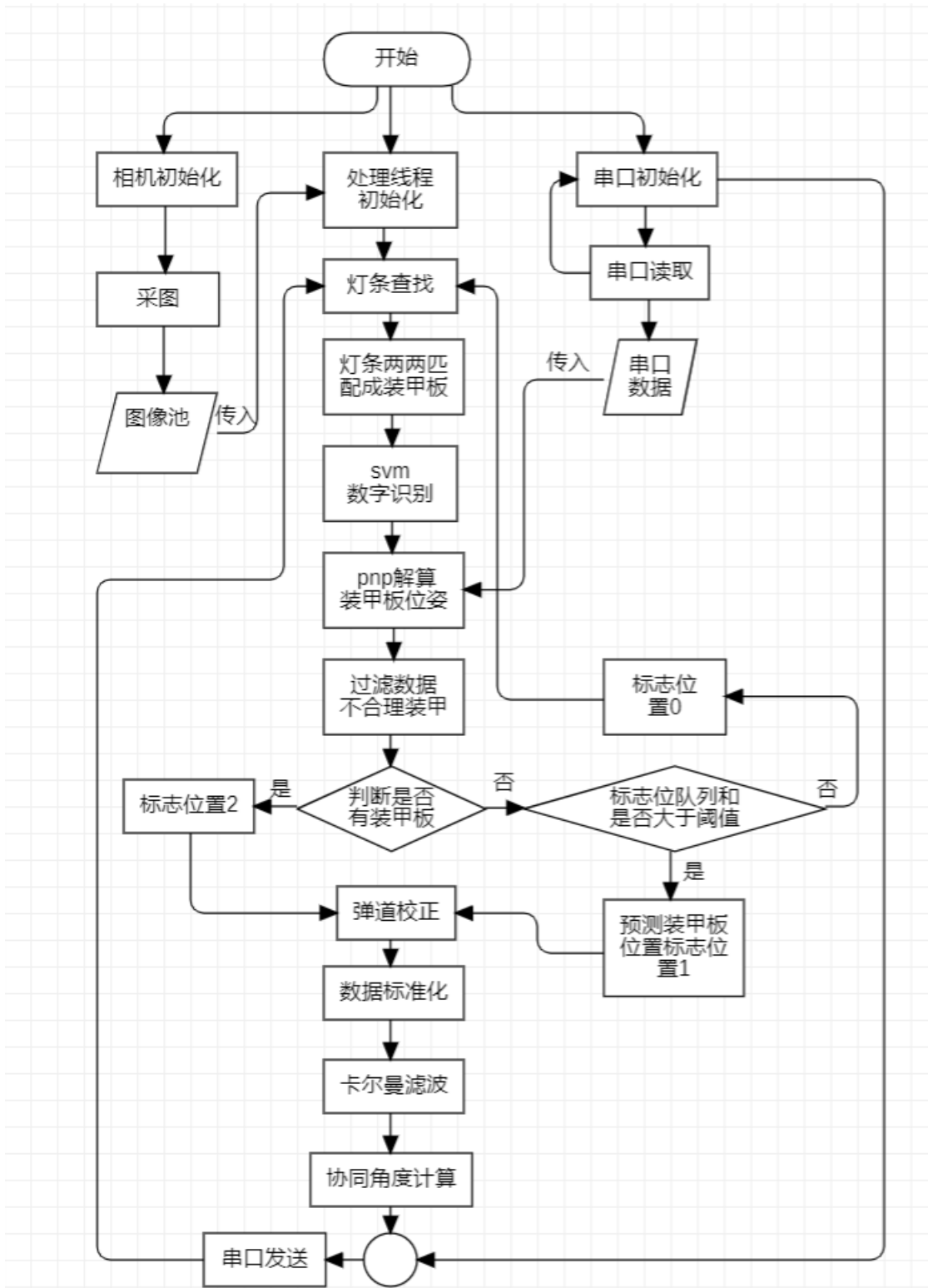


图 2.4.4 哨兵机器人辅瞄流程图

2.4.4.2 设计方案描述

哨兵辅瞄采用多线程设计，相机采图、图像处理、串口读取分别在三个线程中完成，大大提高了辅瞄的运行速度，每秒至少可处理 100 张图片。

灯条查找我们主要采用了 BGR 通道相减+二值化处理的方法获取仅包含灯条的二值化图像，该方案优点是处理速度快，实时性好，但也存在受曝光情况影响大，鲁棒性欠佳的问题。为此我们也设计了 HSV 色域分割的查找方法，该方法分辨颜色更加准确，但处理速度较慢，实时性欠佳。两种识别方案可以通过配置文件切换，避免编译，因此我们可以根据实际赛场情况切换使用两种方案。此外，算法还会根据上一帧的灯条位置来制作 ROI，再在 ROI 中识别当前灯条，从而大大加快灯条的识别速度。

相比上个赛季，本赛季哨兵加入了对装甲板上数字的识别功能，不但大大提高了识别的准确性，防止辅瞄受到图像噪声的干扰，还可以通过数字来确定车辆，从而更好地对打击目标进行选择。辅瞄还使用了卡尔曼滤波来对解算值进行平滑和预测，为运动目标的击打（如反小陀螺功能）打下基础。

在卡尔曼滤波的实现细节中，计算敌方车辆空间位置时，我们采用了球坐标系来替代常用的 X 空间坐标。在每次通过 PNP 解算出装甲板 xyz 空间坐标后，我们会直接将这个坐标重新计算为以哨兵底盘为圆心的球坐标，并将球坐标值送入卡尔曼滤波器进行进一步的滤波和预测。球坐标系下的运动轨迹更符合哨兵云台绕 PITCH 和 YAW 轴的运动方式。因此，在球坐标系下对敌方车辆运动轨迹的预测更加准确，将哨兵对快速运动目标的打击准确率从 20% 提升到了 60%。

此外，我们实现了云台的协同作战，滤波完的角度值还会通过解三角形的原理计算出另一个云台应当转动到的大致位置，从而实现另一个云台从巡航到瞄准的快速响应，公式推导如下：

已知下云台 yaw、pitch、distance，两云台垂直高度 height，可假定上云台 yaw2=yaw，垂直方向上上下下云台构成一三角形。

已知三角形 A=90-pitch，c=height，b=distance，求 B

$$\therefore a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos A$$

$$\therefore a = \sqrt{b^2 + c^2 - 2bc \cos A}$$

$$\therefore \frac{a}{\sin A} = \frac{b}{\sin B}$$

$$\therefore \sin B = \frac{b \sin A}{a}$$

$$B = \sin^{-1}\left(\frac{b \sin A}{a}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{b \sin A}{\sqrt{b^2 + c^2 - 2bc \cos A}}\right)$$

$$\text{即 pitch2} = \sin^{-1}\left(\frac{\text{distance} \cdot \sin(90 - \text{pitch})}{\sqrt{\text{distance}^2 + \text{height}^2 - 2 \cdot \text{distance} \cdot \text{height} \cdot \cos(90 - \text{pitch})}}\right) - 90$$

图 2.4.5 云台协同公式推导图

在击打控制决策上，我们做出了一些改进。新的哨兵的攻击判定逻辑由一个队列来控制，队列会保存前数帧的击打标志位，标志位 0, 1, 2 分别代表无目标、不确定是否有目标和有目标三个状态，通过每次击打前计算队列各位数之和，并通过设定阈值从而实现击打与否的判断，这种方法比起常用的设定缓冲的方式更加灵活，能在保证哨兵不错开枪的情况下令哨兵反应更加敏捷。

2.4.4.3 其他

在开发前期我们使用了 CoppliaSim 平台来对辅瞄算法进行仿真测试。验证算法的可行性和在理想状态下的稳定性，实现在没有实际车辆的情况下测试 PNP 算法的准确性。除此之外，CoppliaSim 软件还支持对仿真场景的自定义，让我们得以尽可能地模拟辅瞄在赛场上的适应情况，并且对可能出现的 bug 加以及时修正。

2.5 研发迭代过程（10）

2.5.1 版本迭代过程记录

表 2.5.1 哨兵机器人版本迭代记录表

版本号或阶段	功能或性能详细说明	完成时间
V1.0	可实现轨道上来回移动、云台巡逻	2022. 1. 02
V1.1	双云台可识别移动中的装甲板并跟踪，底盘加入功率限制	2022. 1. 18
V1.2	下云台实现 360，云台之间协同作战, 底盘加入随机变向	2022. 3. 28

2.5.2 重要问题解决记录

表 2.5.2 哨兵机器人重要问题解决记录表

序号	问题描述	问题产生原因	问题解决方案 &实际解决效果	机器人版本号或阶段	解决人员
1	哨兵在轨道弯曲变形严重处运动时主动轮容易打滑	轨道弯曲变形严重, 主动轮高度固定	优化主动轮安装方式, 可根据轨道实际情况调整主动轮轴线与轨道表面距离, 保证正常接触, 有效解决打滑问题	V1.0	机械组: 谢彩萍
2	上云台卡弹问题较为突出	供弹链路过长, 且弯道较多, 管道堆积的子弹多, 拨盘推力不足	更换上云台, 采用更短的供弹链路, 减少2处弯道, 确保子弹通畅	V1.1	机械组: 谢彩萍
3	找到的灯条无法正确匹配为装甲板	先前的匹配规则为从左往右依次匹配, 两灯条中间可能有噪点	现改为遍历两两匹配, 并且优化灯条是否判定过的条件, 防止重复灯条导致内存溢出	V1.2	算法组: 王家康
4	识别线程帧率过高时云台剧烈抖动	线程之间不同步, 处理线程对相机图像多次复用但对应串口数据不同	给处理线程加延时	V1.2	算法组: 王家康

序号	问题描述	问题产生原因	问题解决方案 &实际解决效果	机器人版本号或阶段	解决人员
5	近处的装甲板识别到后云台不响应	云台处理识别后的角度时判断错误	修改对识别后角度的判断部分	V1.2	嵌软组:邢增宝
6	下云台存在卡弹风险,俯仰角不够	下云台pitch轴部分的管道过于曲折,并且各截管道容易发生错位,弹舱放在发射机构上端占用高度上的空间导致俯仰角不够	更换下云台,将发射机构和弹舱左右放置,使供弹链路的长度大幅缩短,有效做到不卡弹同时增大俯仰角	V1.2	机械组:谢彩萍
7	下云台打弹左右散度较大	包胶的厚度和硬度对子弹的弹道和散布有影响	更换发射机构包胶,下云台使用薄包胶,能够有效减少子弹的左右散步,提高子弹的命中率	V1.2	机械组:谢彩萍

2.6 团队成员贡献

2.6.1 哨兵机器人团队共享奖

姓名	基本信息 (专业、年级、队内角色)	主要负责工作内容描述	贡献度 (所有成员贡献度合计为 100%)
邢增宝	微电子专业、2019 级、哨兵组组长+嵌软组组长	哨兵运动控制算法的编写与测试	25%
谢彩萍	机械设计制造及其自动化、2020 级、机械组组长	哨兵机械结构设计与制作	25%
王家康	生物医学工程、2020 级、算法组组长	哨兵视觉算法编写与测试	25%
潘骋麒	电子信息工程、2019 级、电路组成员	哨兵硬件系统设计与维护	25%

2.7 参考文献

[1]李琼, 陈利, 王维虎. 基于 SVM 的手写体数字快速识别方法研究[J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(2):4.

[2] YUN S H, SEO J, YOON J, et al. 3-dof gravity compensation mechanism for robot waists with the variations of center of mass[C]//2019 IEEE/RSJInternational Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). [S. l.]: IEEE 2019:3565-3570.

[3]大连交通大学 TOE. RM2021-大连交通大学-纵维立方 TOE 战队-哨兵机器人-机械结构开源(出处: RoboMaster)

<https://bbs.robomaster.com/forum.php?mod=viewthread&tid=12298&fromuid=58491>

[4]哈尔滨工业大学 I Hiter. RM2021-哈尔滨工业大学-I Hiter 战队-哨兵机器人-机械结构开源(出处: RoboMaster)

<https://bbs.robomaster.com/forum.php?mod=viewthread&tid=12257&fromuid=58491>

3. 英雄机器人

3.1 其它学校英雄机器人分析综述

21 赛季绝大部分参赛队伍的英雄机器人都采用了下供弹方案，但并没有出现同质化，许多学校都有各自亮眼的设计。中石油（华东）的英雄是为数不多有搬运障碍块机构的英雄，在新规则下，如果英雄能够携带障碍块，不仅可以在吊射时放在前方地上挡住装甲板，还能快速撤走己方环形高地下的障碍块防止对方上高地，或者在对方高地下放置障碍块从而上高地占据有利地形。

广东工业大学和华南理工大学的英雄采用了侧供弹的方式，牺牲了 PITCH 轴的转动惯量，但可以获得更多 PITCH 轴后部空间放置电路板 miniPC 等部件，并且可以获得更大的仰角。大连理工大学的发射机构采用了 V 型结构对弹丸进行定位，获得了很好的发射精度。

桂林电科的英雄并没有使用传统的全包围防护，仅使用碳板对轮毂进行保护，随着英雄射击精度与机动性的提高，在地面与对方硬碰硬的机会越来越少，而且现在的碰撞强度也逐渐减小，全包围防护也不再是必选项，而且去掉全包围防护后英雄还可以获得更大的接近角，对上坡和飞坡都有一定的帮助。

北京理工大学英雄使用了中心供弹机构，在保持大载弹量的同时更充分利用车内空间，减小英雄尺寸，但单电机扭矩不够需要两个电机且拨弹盘整体体积尺寸较大。

上海交通大学应该是最早开始使用自适应悬挂结构的队伍，自适应悬挂可以大大提高英雄对地形的适应能力，但因为避震使用不锈钢加工件，大大增加了底盘重量，可以通过修改结构，优化减震器受力情况从而使用普通减震器代替不锈钢减震器。视觉相关通过 3mm 碳板直连在摩擦轮固定板上，用极度镂空的 5mm 碳板进行摄像头的固定。5mm 碳板具有上佳的刚性，可以避免剧烈运动中摄像头发生晃动。使用两个用圆柱销固定的机加工块从两侧夹紧摄像头，可以很好的保证摄像头的方向精度。

3.2 机器人功能定义

表 3.2.1 英雄机器人功能定义

英雄	功能需求	需求分析/量化指标
底盘	全地形下不会出现翻车	避免出现翻车导致灾难性后果
	具备小陀螺功能	增加被击杀难度
	可以实现飞坡	提高战术灵活性
	快速上下高地	自适应悬挂
	可爬上 37° 坡	接近角、通过角大于 37°
	搬运障碍块，可快拆	可快速上下高地，搭建掩体，防止对方上高地
云台	大仰角	仰角 45°，在近距离攻击哨兵和前哨站
	相机能快速拆装	方便视觉拆下调整参数
武器系统	下供弹	降低重心，减小体积
	具备辅助瞄准功能	辅助提高瞄准精度，5 米吊射精度 100%
	稳定性高	弹丸限位结构不漏弹不卡弹，弹速稳定
	射击精度	8m 大装甲命中率 100%、20m 直径 600mm 目标命中率 50%
	弹速稳定性	弹速在 15.5m/s 左右，波动范围在 0.2m/s 内
	射频	6Hz 不卡弹
	载弹量	80 发
	链路稳定性高	连续发射 150 发弹丸不卡弹
其他	易维护	易损件更换 1-2 分钟，大件维修更换 10-15 分钟
	电路易检修维护	快拆防护、电路走线清晰规范、有足够空间进行操作
	稳定性高	电路安装牢固、接头不松动，机械核心部件不易损坏
	工业设计	美观

3.3 机器人核心参数

表 3.3.1 英雄机器人核心参数

参数	描述
重量	23.5kg
尺寸（长宽高）	67cm×51.3cm×54.5cm
电容容量	1999J
最大工作电压	24V
电机数目与用途	GM6020×2：云台 Pitch 与 Yaw 轴驱动 M3508×7：底盘驱动、拨弹电机、摩擦轮电机
车体最大移动速度	3.5m/s
2m 加速用时	0.6s

3.4 设计方案

3.4.1 机械结构设计

3.4.1.1 结构设计

● 底盘结构设计

底盘使用板材拼插结构将四根纵梁铝管连接起来，因为板材适合承受板面的切向力，通过不同方向的板材的拼接，使结构可以很好的承受各方向的力，保证强度的同时最大限度减轻重量，同时节省出较多空间放置电路元件。模块化设计方便底盘的拆装，核心模块可以整块更换，大大缩短维修时间。

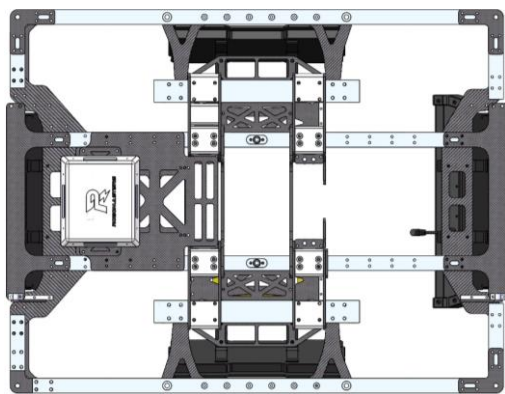


图 3.4.1 底盘框架

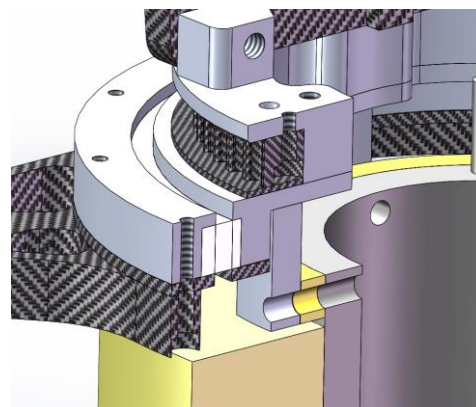


图 3.4.2 YAW 轴剖视图

● YAW 轴结构设计

YAW 轴使用 RA10008 交叉滚子轴承，通过 2mm 碳板与机加工件夹紧固定，同步带轮固定在与 YAW 轴链路连接的法兰上，法兰和滑环转子都安装在转子加工件上。YAW 轴安装板与 6020 电机安装板分别采用了 10mm 和 6mm 的碳板，在同等重量下“厚板材+大减重”的抗弯能力要好于“薄板材+少减重”的方式，这样可以做到以最小的板材体积和面积达到受力的要求。

● 发射机构结构设计

1) 摩擦轮定位

摩擦轮电机安装板通常只由螺栓安装在摩擦管上，难以保证安装精度，导致摩擦轮不对称，对弹道散布影响较大。今年在摩擦管上方加入凸台，通过与电机安装板上的槽口配合进行安装板的定位，摩擦轮电机则通过定子端凸起的圆环与安装板上的孔配合进行定位，提高定位精度。由于刀具磨损和加工精度问题，槽口和孔尺寸需要留大一点，以确保实际孔和槽口尺寸与凸台完全配合。为了确定要预留的大小，要预先雕一块尺寸测试板，板上有若个个以 0.05mm 为步距逐渐增大的槽口和孔，通过测试板上的槽口与凸台配合确定槽口和孔的最小尺寸，确保安装板与电机无晃动。

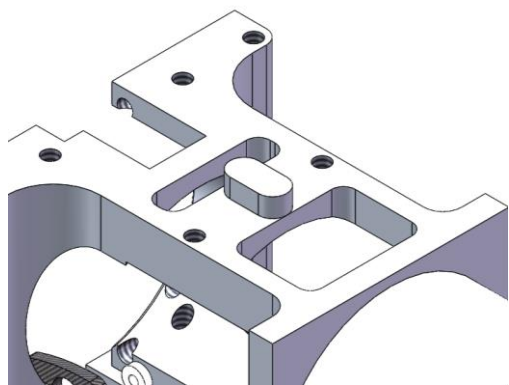


图 3.4.3 摩擦管上方凸台

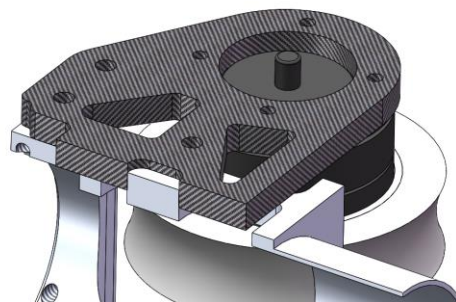


图 3.4.4 凸台与槽口配合定位

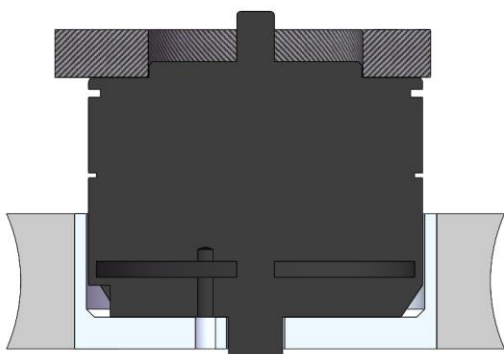


图 3.4.5 电机凸台与安装孔配合定位

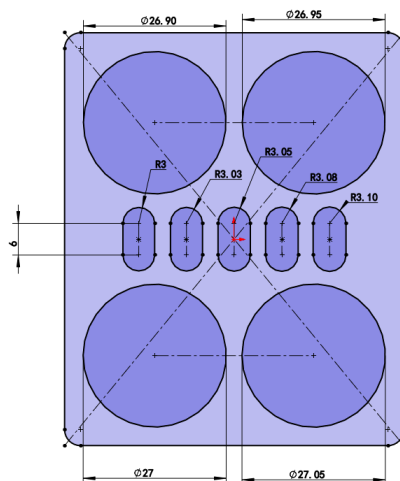


图 3.4.6 加工尺寸测试板

2) 摩擦轮包胶

21 赛季采用了弧形包胶，弧形包胶在挤压弹丸时，若弹丸与弧形包胶中心不同心，则在该偏移方向上对弹丸两侧有压力差，产生一个向中心的合力，可以在一定程度上纠正弹丸中心的偏差，但由于合力不过弹丸中心，会使弹丸在发射时发生自旋，影响弹道。但如果摩擦管使用了 V 型轨道定心后，可能因为装配精度与板材厚度的误差，导致弧形包胶的中心与摩擦管弹丸定心的中心不重合，在发射的过程中，弹丸与摩擦轮接触瞬间对弹丸产生一个偏向力，使弹道偏移甚至增大散布。

平包胶：平包胶对摩擦轮高度精度要求较小，但因为与弹丸接触面积小，包胶表面较易磨损形成凹痕，而不规则的凹痕会对弹道产生较大的影响，需要经常更换。

弧面包胶：弧面包胶对摩擦轮安装精度要求较高，与弹丸接触面积较大而且在竖直方向上挤压力分布更加均匀，在相同挤压量下，传递的动能更多。

● 快拆设计

1) 搭扣快拆

在云台上部和底盘中部设计了两处搭扣快拆，搭扣快拆适用于对强度要求不高且体积较大的地方，搭扣快拆可以快速开合，方便电路检修，和机械检查供弹链路。

2) 螺栓快拆

英雄防护使用 1mm 玻纤板拼接成一体壳，拆下时只用拧下四颗螺栓就可以将前半部防护壳整体拆下。



图 3.4.7 云台搭扣快拆

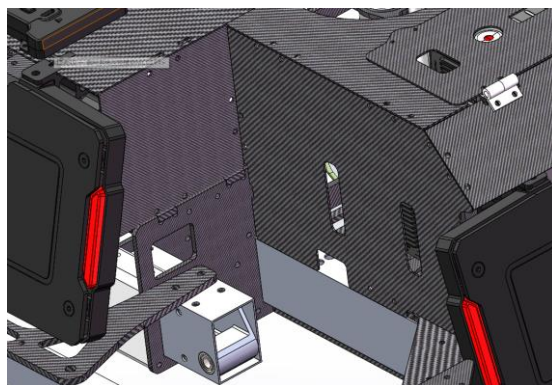


图 3.4.8 防护外壳

3.4.1.2 工艺选择

整车主要采用板材、打印件、铝方管和铝加工件。其中，板材主要使用实验室的雕刻机进行 2D 雕刻，部分精度要求较高的板材，如摩擦轮安装板等，则外发外包加工；3D 打印件大部分使用实验室 3D 打印机打印，部分精度要求较高或较难打印的则外发打印；铝管使用实验室设备进行切割和打孔，如需开槽的则外发加工；铝加工件则全部外包加工厂加工。

3.4.1.3 电路元件安装走线

底盘板和降压模块组合成一个小模块，再安装到底盘的铜柱上，超级电容同理安装在侧面，电池架和电源管理模块安装在前装甲板支架上。电路滑环线定子端中电源线走车右侧，信号线走左侧避免交叉混乱，转子端则合成一股绕至 YAW 轴侧面向上进入云台，避免 PITCH 轴俯仰运动时线路长短变化。NUC 主板用自制打印件保护并安装在云台侧面。

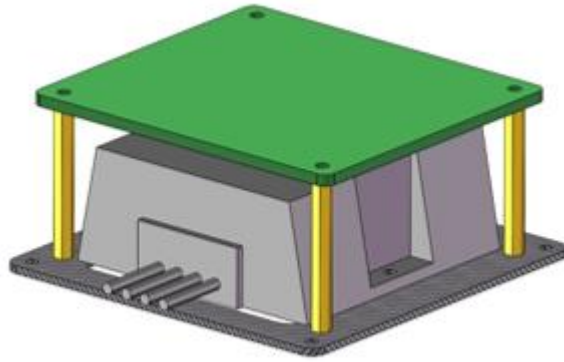


图 3.4.9 稳压模块和底盘板

3.4.2 硬件设计

3.4.2.1 整机硬件方案框图

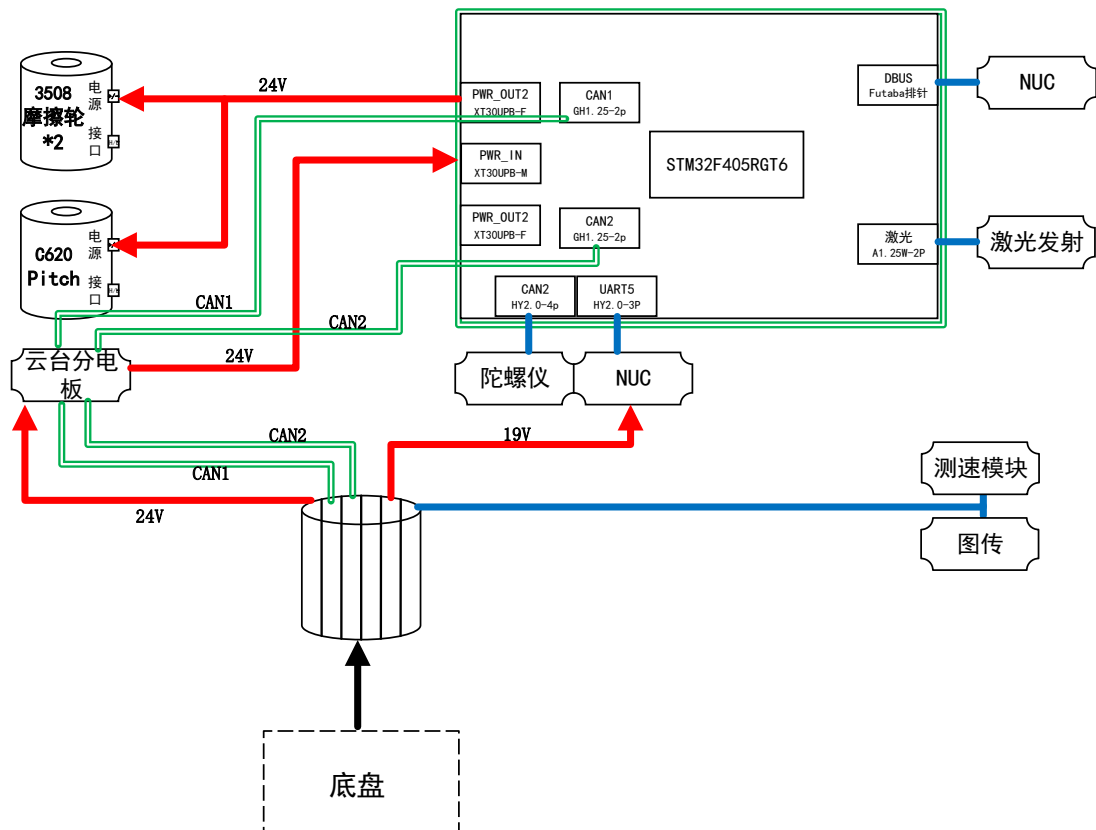


图 3.4.9 云台连接框图

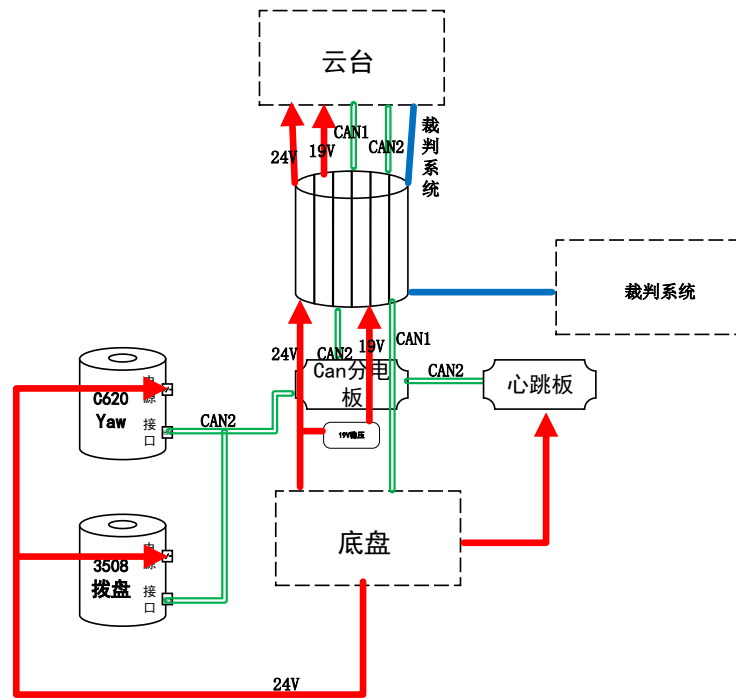


图 3.4.10 底盘连接框图

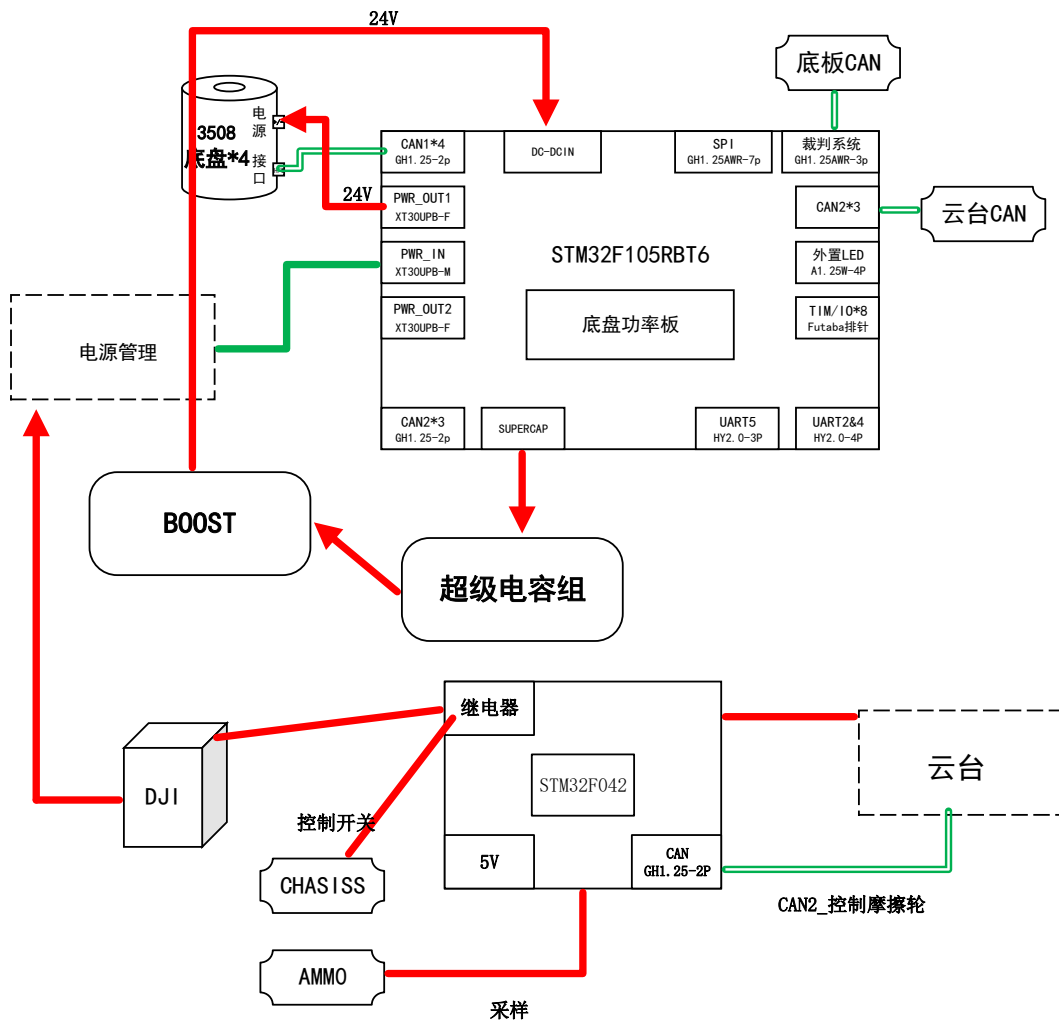


图 11 融合电源树

3.4.2.2 硬件详细设计

(1) 底盘部分

根据英雄机器人需求，底盘主控板集成超级电容充放电控制部分、底盘电机控制、裁判系统通信及云台通信部分，为实现底盘完整功能，底盘需对输入功率以及输出给电机/超级电容的功率进行检测。整板由裁判系统电源管理底盘接口输入，经电压电流检测芯片，由超级电容充电控制部分决定是否给超级电容充电，给单片机系统供电部分先由开关电源将电压降到 5V，再用 LDO 去除开关电源产生的噪声并降压到 3.3V 给单片机供电。超级电容放电时经过 24V 稳压模块再到板子，输出电源可在超级电容与输入间进行选择，经由输出功率检测后直接给电机供电。单片机搭载两个 CAN 收发器以满足 CAN 通信需求。

(2) 心跳板

心跳板是两个电路模块的集成。其一为继电器，通过裁判系统 chassis 口的通断来控制云台的电源。其二为一最小系统，以固定时间段采样 ammo 口并通过 can 通信传给云台以此来控制摩擦轮的通断。

(3) 云台部分

云台供电为电池并由心跳板控制，minipc 经 24 转 19 模块后给 NUC 供电，其他外设如遥控接收机、陀螺仪、激光均由过流更大的开关电源供电。陀螺仪独立于主控板外，搭载其他单片机主控，与主控板间使用 CAN 通信。主控板与 NUC 之间配上自研 USB 转串口模块使用串口通信。

3.4.2.3 关键器件选型

表 3.4.1 英雄机器人关键器件选型

器件类型	选型
主控芯片	STM32F105RBT6、STM32F405RGT6、STM32F042F6P6
24V 转 5V 稳压	MP2482、MP2451
5V 转 3V3 LDO	SPX3819M5-3.3L
TVS	SMBJ24A

USB 转串口芯片	CP2102
CAN 收发器	TCAN33x, TJA1050
功率检测芯片	INA260
陀螺仪	ICM20602, QMC5883L
晶振	8MHZ, 3225/5032 封装
二极管	IN5819, 1N4007, 1N4148, SS54
超级电容	2.7V/60F
电容保护芯片	BW6101
充电控制芯片	BQ24640
双路电源选择芯片	LTC1473
MOS	CSD18543 , CSD18532 , AO3400 , AO3401, SS8050, SS8550

3.4.3 软件设计

3.4.3.1 系统框架

依托于 FreeRTOS 操作系统的各个功能模块，通过创建任务和系统调用来实现整体的系统架构。另外，我们结合有线和无线两种方式进行 debug 调试，借助 keil、jscope、vofa 等软件，对系统的各个反馈值和控制值进行检测，例如陀螺仪、云台和底盘电机的编码器数据是否符合要求，另外依靠正点原子的无线调试器来调整底盘运动中功率的变化和缓冲能量的使用率。我们还将程序分为初始化硬件模块与逻辑应用模块,实现分层设计,避免两者相互干扰,并且便于后续调试。

3.4.3.2 运行流程

首先进行各个硬件模块的初始化，如 CAN 通信、USART 通信、编码器采集、定时器配

置与看门狗初始化配置等，之后我们将所要实现的功能划分成不同的任务，包括了对云台、底盘、摩擦轮射击和遥控器选择模式的控制任务和掉线检测任务，各个任务之间通过 freertos 优先级调度的机制循环运行。同时，借助 CAN 通信、串口通信等外部中断获取到实时有效的数据，各个任务将获取到的数据更新于控制算法中，并最后输出给到电机等执行机构，实现整个系统的闭环控制。另外加入滤波算法来保证系统读取信号的稳定性和正确性，减少噪声干扰。

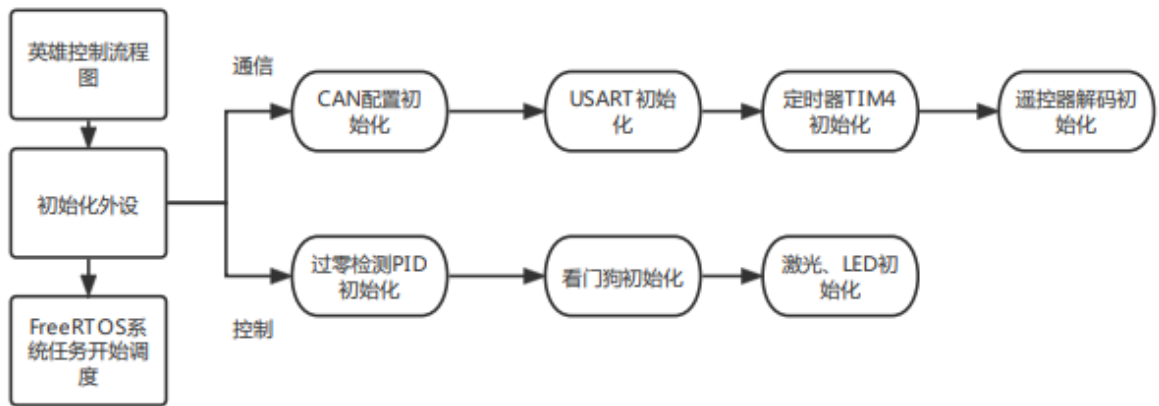


图 3.4.13 整体运行流程图

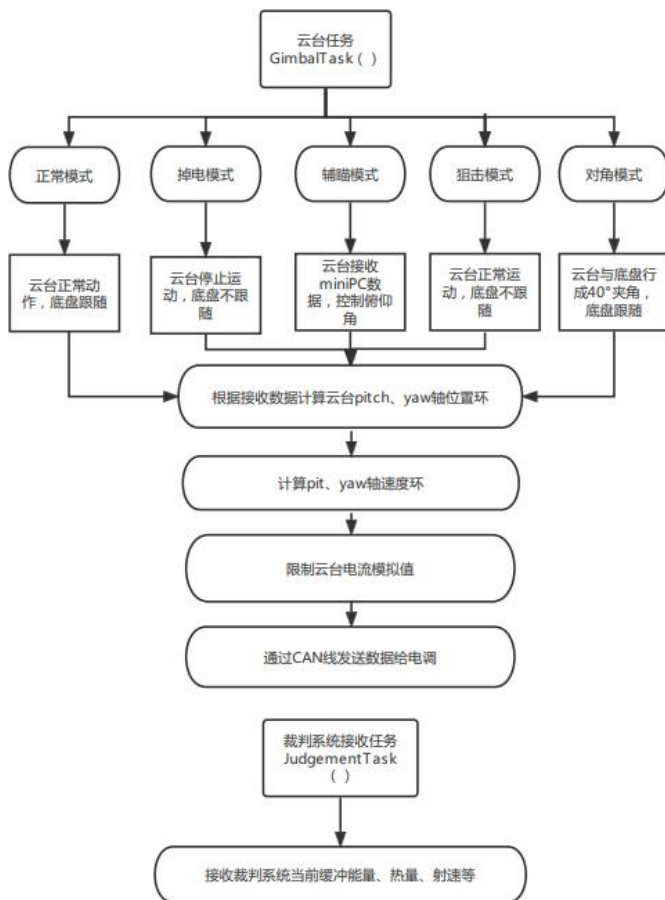


图 3.4.13 云台运行流程图

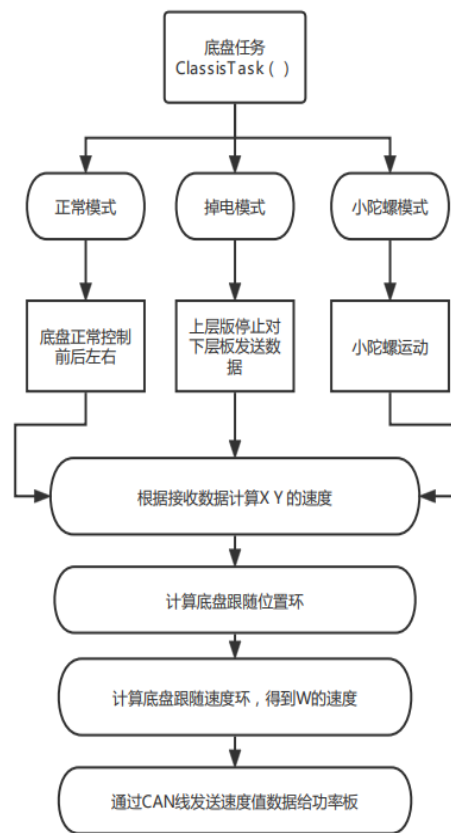


图 3.4.12 底盘运行流程图

3.4.3.3 重点功能

(1) 底盘功率限制功能

通过采集裁判系统功率检测模块来对英雄机器人进行实时的功率配置控制，防止因为超功率而违反规则死亡。在起伏路面降低底盘电机转速，保证扭矩。

(2) 发射热量限制功能

通过检测裁判系统反馈的实时枪口热量和冷却数据，对发射大弹丸进行限制，防止因为超热量而死亡。

(3) 云台自适应模糊控制功能

加入了模糊 pid 控制算法，保证云台在各个位置都保持更好的稳定性，加快运动时的响应时间，降低静态时的角度偏差，保证英雄机器人在移动视角和进行设计任务时稳定发挥。

(4) 底盘控制模式切换和超级电容模块

提供基于键盘按键的底盘模式切换功能，可以实现机器人对角模式前进、基础的底盘跟随前进、小陀螺运动前进等功能，保证了操作手在机器人遇到不同场景可以进行有效应对。另外，加入了超级电容模块，能够在短时间内提供非常大的功率输出并且不会违反裁判系统功率限制的规则，极大提高了机器人的机动性。

3.4.4 算法设计

3.4.4.1 功能介绍与 pipeline

(1) 代码整体流程

英雄机器人的辅瞄系统通过筛选灯条特征来拼接成候选装甲板，同时通过 SVM 对装甲贴纸进行分类，从而增强装甲识别的鲁棒性。对所有候选装甲进行优先级筛选以确定击打目标，并使用 PNP 算法估计位姿，并转换到世界系。最后通过卡尔曼滤波的前向预测进行位姿估计，再加上物理建模的弹道补偿，得到云台的 yaw 和 pitch 的绝对角度，发送给下位机，实现云台控制。总体框图如图 3.4.16 所示。

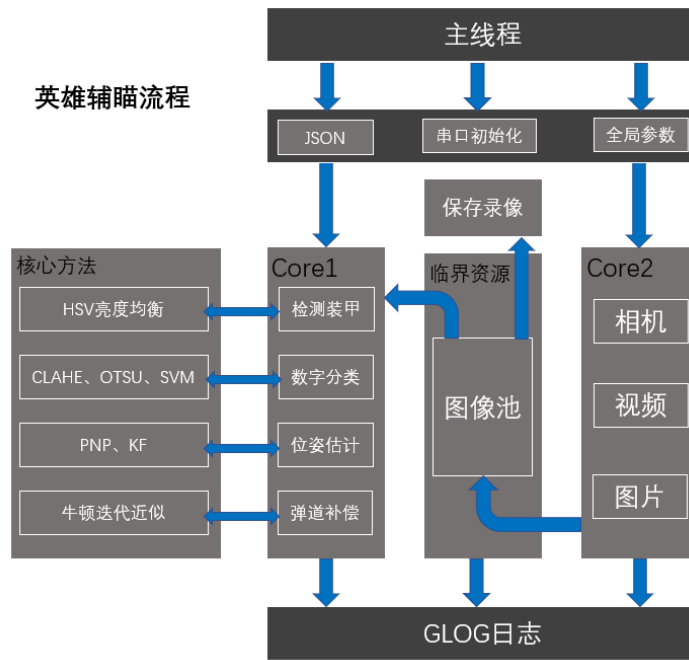


图 3.4.14 辅瞄流程框图

(2) 装甲检测流程

目标检测包含四个过程，分别为图像预处理，灯条识别，装甲板识别，数字识别。

图像预处理阶段，系统对 BGR 图像进行通道分离，将两个通道值相减再进行阈值分割，查找轮廓得到预备灯条。

灯条识别阶段采用包括灯条的长宽比，面积以及角度等几何特征筛选的办法。装甲板识别是通过匹配灯条来实现的，考虑的特征包括装甲长宽比，灯条角度差等。

(3) 分类器训练流程

由于测试场地和赛场环境差异度较大，所以在尽可能抗环境干扰的前提下，一套快速在新环境下制作数据集以及训练模型的 pipeline 也可以迅速得到更适应环境的分类器。

首先通过配置文件打开装甲的录制功能，辅瞄系统会将检测到的装甲使用原分类器进行预分类，并放置到对应的文件夹中。其次，需要手动/更重量级的分类器进行进一步筛选，并加入到训练集中。手动筛选时可以通过 python 脚本实现图片自动读取+键盘按键自动移动的方式来处理误分类的装甲。最后使用预先写好的训练文件从固定路径读取数据完成训练，并在测试集上评估性能。

3.4.4.2 重要算法原理阐述及公式推导

(1) 数字分类器实现

数字分类阶段首先从原图中取出 ROI，变换成相同的尺度。然后将得图像转为灰度图，并使用对比度受限的自适应直方图均衡化（CLAHE），做灰度均衡，通过 OTSU 二值化方法进行阈值分割，得到分割较为完整的灰度图。最后将处理好的图像放进 SVM 分类器内，分类器将得到目标装甲板的数字。

(2) 弹道方程建模

考虑理想斜抛运动，

$$\begin{cases} v \cos(\theta)t = z \\ v \sin(\theta)t - \frac{1}{2}gt^2 = y \end{cases}$$

消去时间 t 得到，

$$y - z \tan(\theta) - \frac{g}{2v^2 \cos^2(\theta)} z^2 = 0$$

通过牛顿迭代，可以得到 pitch 角的数值解。

(3) 位姿解算和估计

使用 PNP 算法解算装甲的位姿，并变换到世界系和其他需要的坐标系中。

卡尔曼滤波建模。由于当前场景下装甲的高度一般不会变化，所以只对世界系中的水平面上坐标进行建模。同时考虑其一阶差分量，作为估计的速度。

卡尔曼滤波预测下一时刻状态的公式如下，

$$\begin{aligned} \hat{x}_k &= A_k \hat{x}_{k-1} + B_k u_k \\ P_k &= A_k P_{k-1} A_k^T + Q \end{aligned}$$

卡尔曼滤波融合数据，修正当前状态的公式如下，

$$\begin{aligned} K_k &= \frac{P_k H_k^T}{H_k P_k H_k^T + R} \\ \hat{x}_k &= \hat{x}_k + K_k (z_k - H_k \hat{x}_k) \\ P_k &= (I - K_k H_k) P_k \end{aligned}$$

OpenCV 中的前向预测只能预测一帧，但是做位姿估计时考虑的迭代次数远大于一次（近似为子弹飞行时间/处理一帧图像的时间），所以需要参考 OpenCV 的 predic 函数（矩阵广义乘法），实现能够迭代预测多次但不修改 kf 内部状态的功能。以此作为辅瞄预测器的前向预测函数。

3.4.4.3 算法性能、优缺点分析、优化方案

(1) 算法性能

检测一帧 1280*1024 的图像时延在 3-8ms 左右。相机线程取图时延在 5ms 左右。

(2) 优点

1) 使用传统视觉进行检测，处理分辨率为 1280x1024 图片的处理帧率为 130 帧，满足实时性的要求。

2) 数字识别在各种灯照条件下测试，并且对数据集使用 γ 变换进行数据增强，识别的鲁棒性进一步提升。

(3) 缺点

使用传统视觉对光照条件依赖很高，需要根据场地光照条件调整相机曝光等一系列参数，不能做到开箱即用。

(4) 优化方案

1) 目前的预测器对非线性运动的预测效果不好，考虑使用 EKF、UKF 等非线性预测器，或者使用 Singer 模型。

2) 检测算法在遇到高光强（比如太阳光直射）等环境，存在不能检测正确检测到灯条和装甲的情况。

3.4.4.4 算法库介绍与接口说明

英雄视觉使用到的外部库主要包括 OpenCV、Eigen、Sophus、GLOG、pangolin、jsoncpp、boost。

3.4.4.5 算法结果

装甲检测效果，其中绿色为检测的灯条，红框为筛选的装甲。

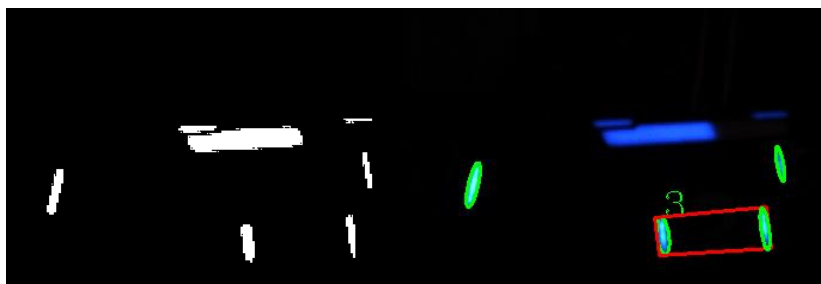


图 3.4.15 装甲检测效果图

数字分类效果，从左到右依次为：装甲 ROI、灰度图、CALHE 均衡、OTSU 分割。

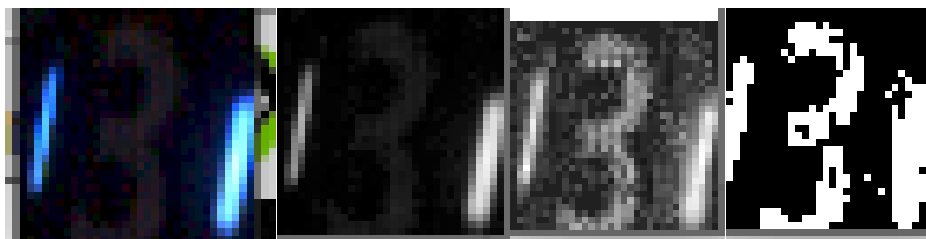


图 3.4.16 数字分类效果图

3.4.5 UI 设计

UI 主要由机器人信息和瞄准线两部分组成。其中，机器人信息包括：pitch 轴角度，底盘模式，激光瞄准器状态，超级电容状态，摩擦轮状态。瞄准线中不同长度横线代表不同距离外枪口应当瞄准的高度。

3.5 研发迭代过程

3.5.1 版本迭代过程记录

表 3.5.1 英雄机器人版本迭代记录

版本号或阶段	功能或性能详细说明	完成时间
V1.0	第一版英雄	2021.12.05
V1.1	优化 YAW 轴结构	2021.1.10
V2.0	更改了底盘框架结构	2022.3.25
V2.1	优化供弹链路，解决卡弹问题	2022.3.30
V2.2	更改云台结构与防护	2022.4.10

3.5.2 重点问题解决记录

表 3.5.2 英雄机器人重点问题解决记录表

序号	问题描述	问题产生原因	问题解决方案 &实际解决效 果	机器人版 本号或阶 段	解决人员
1	云台 YAW 轴部分发生干涉，且安装难度大	画图时没有考虑安装顺序和难度，没有考虑螺栓占用空间	修改 YAW 轴结构	V1.0	机械工程师: 林俊熙
2	横梁云台铝柱安装处发生变形	铝管厚度薄，铝柱与横梁接触面积小，应力集中	在铝管壁两侧垫上两块 3mm 玻纤板	V1.1	机械工程师: 林俊熙 硬件工程师: 牛茂森 嵌入式软件工程师: 江扬新
3	横梁铝方管与轮组安装管连接处发生明显变形	铝管厚度薄，加上大镂空，强度不足	更换底盘框架结构	V1.1	机械工程师: 林俊熙 硬件工程师: 牛茂森 嵌入式软件工程师: 江扬新
4	拨弹仓卡弹	拨弹仓外围向内收敛的边缘与拨叉打印件挤压上层弹丸	更改边缘形状，不向中心收缩	V1.1	机械工程师: 林俊熙 硬件工程师: 牛茂森 嵌入式软件工程师: 江扬新
5	弹道散布较大，且拆装后散布变化明显	摩擦轮安装板仅靠螺栓定	在摩擦管上方增加凸台进行	V2.1	机械工程师: 林俊熙

		位，安装精度低	定位，电机利用凸环定位		熙 硬件工程师：牛茂森 嵌入式软件工程师：江扬新
--	--	---------	-------------	--	--------------------------------

3.6 团队成员贡献

表 3.6.1 团队成员贡献表

姓名	基本信息 (专业、年级、队内角色)	主要负责工作内容描述	贡献度 (所有成员贡献度合计为 100%)
林俊熙	机械设计制造及其自动化、大三、机械负责人、英雄项目组组长	负责整个机器人的机械结构设计和制作安装，英雄组管理	28%
江扬新	机械设计制造及其自动化、大三、嵌入式开发负责人	负责整个机器人的嵌入式开发，包括底盘控制、云台控制等	24%
邓泽晖	计算机科学与技术、大三、算法开发负责人	负责整个机器人的视觉算法开发，包括辅助瞄准、视觉定位等	24%
牛茂森	光电信息科学与工程、大二、硬件电路负责人	负责整个机器人硬件部分，包括电路安装布线，电路模块的开发等	24%

3.7 参考文献

表 3.7.1 团队成员贡献表

参考文献	链接
大连理工英雄开源	RM2021-大连理工大学-凌 BUG 战队-英雄机器人-机械结构+技术报...【RoboMaster 论坛-科技宅天堂】
上海交通大学英雄开源	RM2021-上海交通大学-云汉交龙战队-英雄机器人-机械结构开源【RoboMaster 论坛-科技宅天堂】
桂林电子科技大学英雄开源	RM2021-桂林电子科技大学 Evolution 战队摩擦轮英雄机械结构开源【RoboMaster 论坛-科技宅天堂】

4. 工程机器人

4.1 其它学校步兵机器人分析综述（5）

4.1.1 工程底盘选型

RM 比赛中绝大多数队伍都使用了麦轮底盘，其优点很明显：行动灵活，反应迅速可以适应赛场上多变的比赛情况。也有少部分队伍使用了全向轮的结构，但是在取矿空接过程中，全向轮的适用性并没有麦轮的好，在对准矿石的过程中会有较大的晃动。所以新赛季依旧沿用了之前的工程的悬挂系统，参赛的各队伍的选择集中在四轮独立悬挂和非独立的自适应悬挂之间。独立悬挂可以提供给工程底盘设计更大的灵活度，整体重量也较轻，设计也很方便，便于计算避震器的劲度系数以便在取矿和起伏路段之间有更好的适应和取舍。本赛季也考虑过多轮底盘的可能性，但是由于研发人员的不足以及考虑到多轮底盘会大大增加工程底盘的重量，所以放弃了该方案，但是对于独立悬挂进行了很大的改动，更改了弹簧的劲度系数，以及弹簧的位置，使整体悬挂的空间大大减少，优化了底盘布局。

4.1.2 工程上层的选型

目前工程的上层主要分为两种类型，一种是夹爪类型，还有一种是吸盘类型。由于之前的很多年比赛都采用的是夹爪结构，吸盘结构在最新的规则中脱颖而出，由于其空接高度高，取矿相比夹爪容错率高，机械结构设计相比于夹爪简单，今年很多队伍都采用了吸盘结构。但是我们赛季初考虑到吸盘的持续吸力并不一定稳定，在争夺中可能抢不过夹爪结构，所以采用了四连杆夹爪结构，其是目前理论夹爪类型空接高度最高的结构。四连杆同时具有向前和向上的运动，所以取矿的响应快，在同等情况下可以更快接触到矿石，在矿石抢夺中占据优势。

二级抬升的结构大部分队伍都选择了链条或者同步带的方式，我们采用了链条抬升，因为其结构稳定耐用，受力程度好，在赛场上有着更高的可靠性。但是这也导致工程车的上层在抬升时重心会偏向一边（向前或向后）。目前的解决办法是把链条的位置移动到工程车的对角线，底下用联轴器连到电机，可以使上层在抬升时不会有较大的倾斜。

二级前移采用导轨滑块，动力源选择为 CDJ2B10-200 的气缸。导轨滑块摩擦力小，受力好，气缸可以快速响应，是非常经典的直线副结构。缺点是只有电磁阀的通断控制，不能对其进行准确控制。

4.2 机器人功能定义（10）

表 4.2.1 工程机器人功能定义表

工程	功能需求	需求分析/量化指标
底盘	全地形下不会出现翻车	避免出现翻车导致灾难性后果
	可以稳定对准	精准取矿
	复活己方单位	准确伸出救援卡
	救援己方单位	准确连接己方单位
	机动性强	兑换矿石，救援己方单位
上层	实现快速取矿	空接成功率 80%以上，可以快速抢矿
	提供稳定视角	可以看到矿石位置，pitch 轴可以转动
其他	移动障碍快	移动己方障碍快防守 R2 环形高地

4.3 机器人核心参数（5）

表 4.3.1 工程机器人主要核心参数表

参数	描述
重量	31.0kg
尺寸（长宽高）	58.5cm×58.5cm×59.5cm
最大工作电压	24V
电机数目与用途	M3508×4：底盘驱动 M3508×2：四连杆抬升 M3508×2：二级抬升 RM2006×1：矿石 pitch 轴转动
车体最大移动速度	2.5m/s
爬坡角度	60°

4.4 设计方案（50）

4.4.1 机械结构设计

4.4.1.1 整体设计、核心结构设计说明

（一）工程底盘悬挂部分

底盘采用独立悬挂结构，减少高度上所占据的空间。整体框架如下图 4.4.1.1：

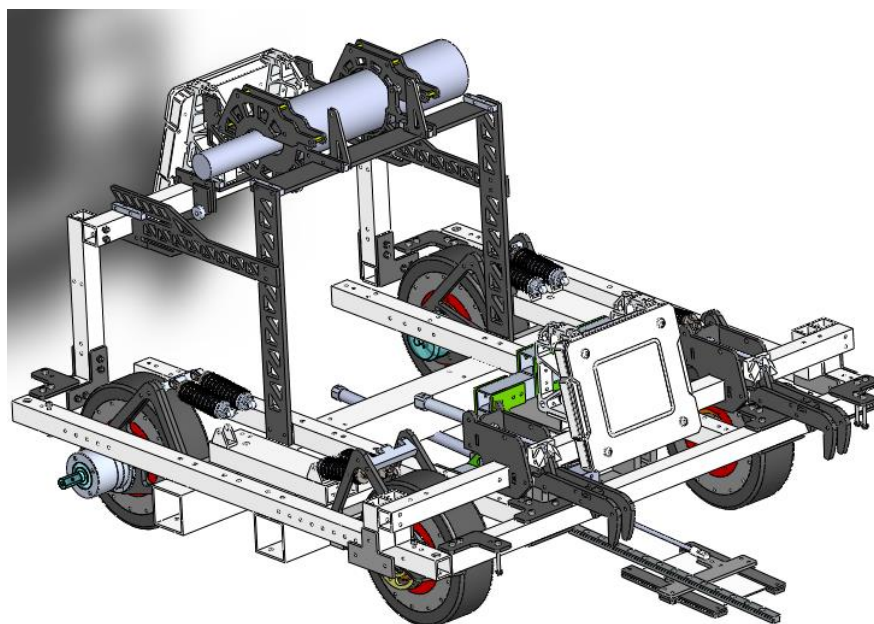


图 4.4.1.1 工程底盘整体框架图

通过调节避震器弹簧的进度系数以保证单个轮组避震在取矿时和起伏路面时都有良好的适应。

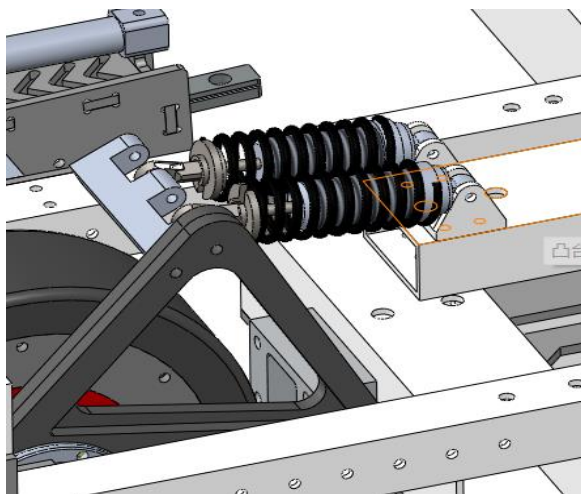


图 4.4.1.2 工程底盘悬挂

（二）工程防护部分

外框采用铝管板材拼接的方式提高防撞性能；电路防护则利用合页实现快拆，方便线路修改和维修。

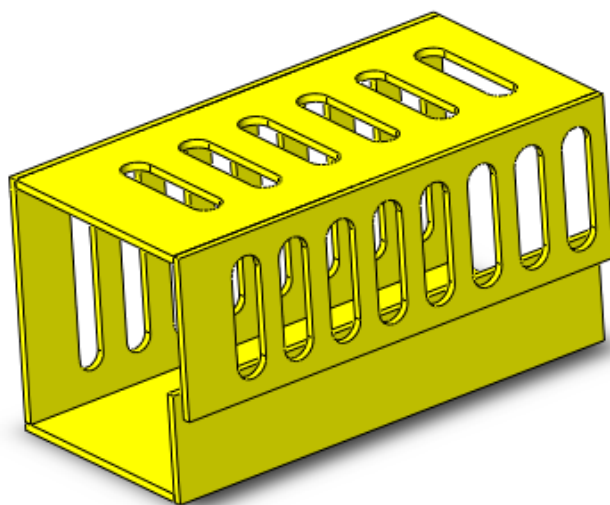


图 4.4.1.3 防护外壳效果图

（四）上层部分

工程上层采用四连杆结构，通过 3508 电机带动齿轮驱动四连杆完成运动；搭配多组气缸配合四连杆进行运动，可以灵活的完成前移取矿的动作，通过搭配气缸，也提高了上层结构的响应速度。

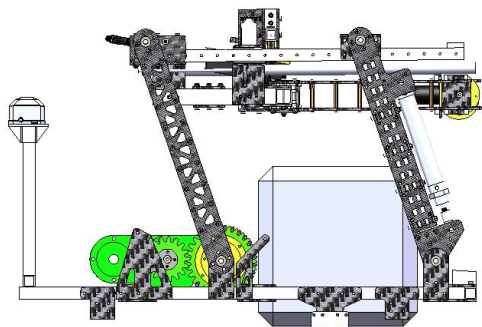


图 4.4.1.4 上层侧视图

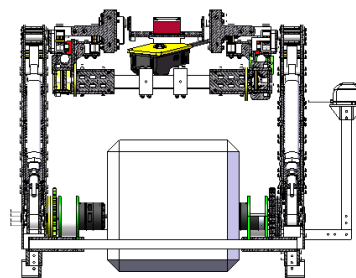


图 4.4.1.5 上层主视图

（五）复活机构

复活机构通过气缸驱动进行前移，配有滑块导轨，及对其进行进一步固定保证其稳定性，又有减小阻力增长机构使用寿命的作用。

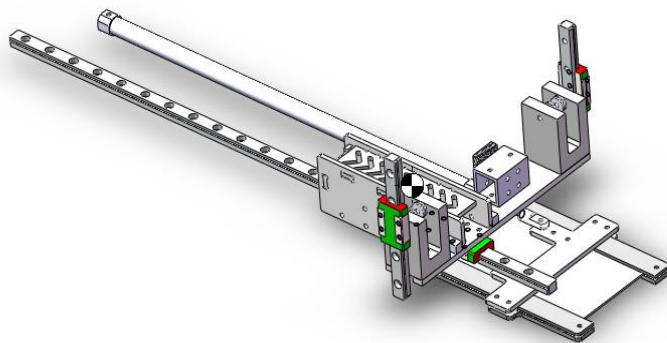


图 4.4.1.6 复活机构

（六）救援机构

救援抓利用气缸连杆结构通过对其他兵种进行抓取，实现救援功能。同时通过将救援抓直接固定在铝管上的方法，在提高救援高度的同时有效节省了救援装置所占用的空间。

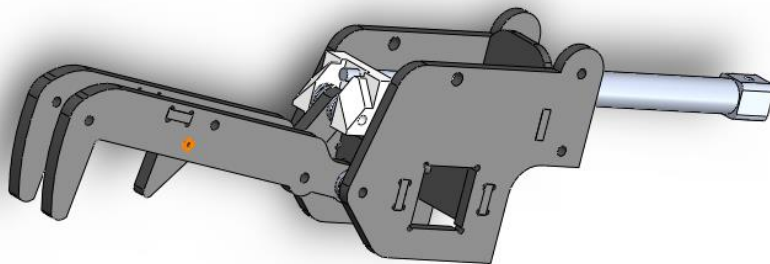


图 4.4.1.7 救援抓

4.4.1.2 核心零件的有限元分析、静动力学分析

(一) 关键零部件有限元分析

救援抓：用于拖取其他兵种进行救援，要求救援抓承力（按照承载 80N 的力计算）后，纵向形变量小于 0.5mm。如下图 1.4.1.8 所示，该零件强度符合要求。

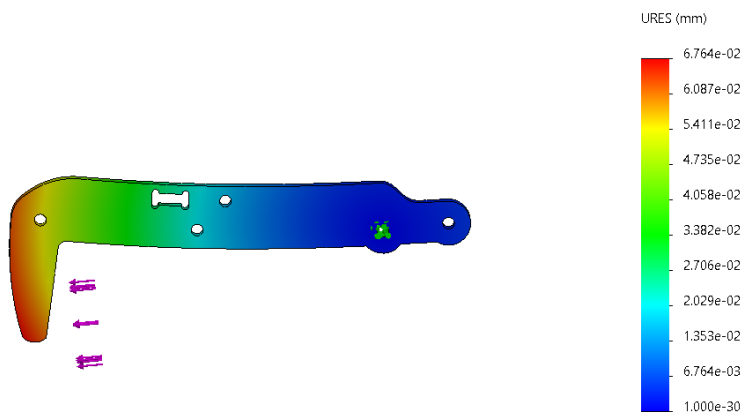
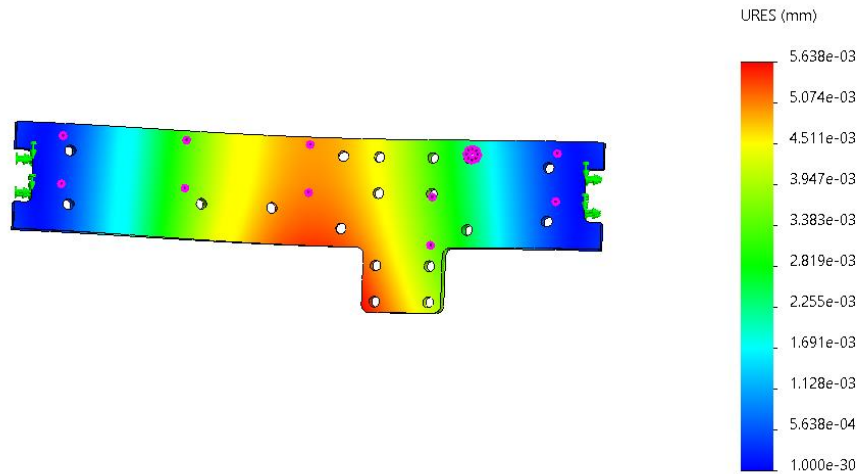


图 1.4.1.8 救援抓有限元分析效果图

复活固定板：用于承载复活机构，要求承受复活机构重量（按照承载 10N 的力计算）后，纵向形变量小于 0.2mm。如下图 1.4.1.9 所示，该零件强度符合要求。



复活固定板

图 1. 4. 1. 9 复活固定板有限元分析效果图

取矿夹爪：用于夹取矿石，要求承受矿石的压力（按照承载 10N 的力来计算）后，型变量小于 0.2mm。如下图所示，该零件强度符合要求。

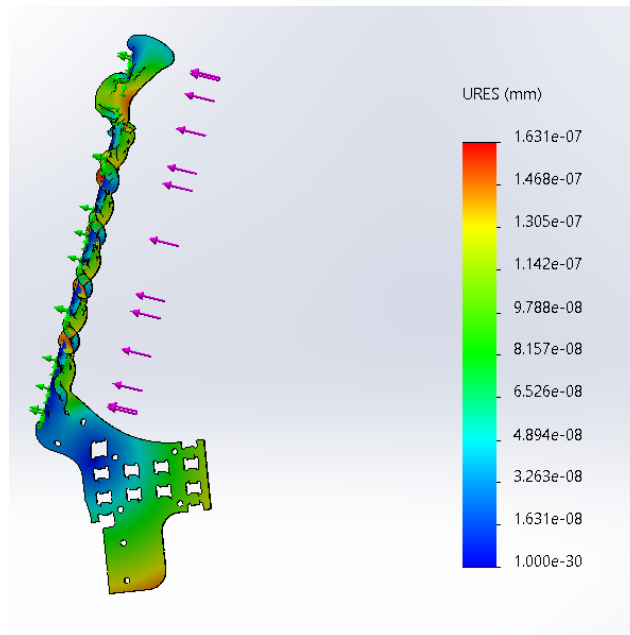


图 1. 4. 1. 10 取矿夹爪有限元分析效果图

4.4.2 硬件设计

4.4.2.1 整机硬件框图

工程的云台和底盘硬件框图如下图 4.4.2.1 和图 4.4.2.2 所示

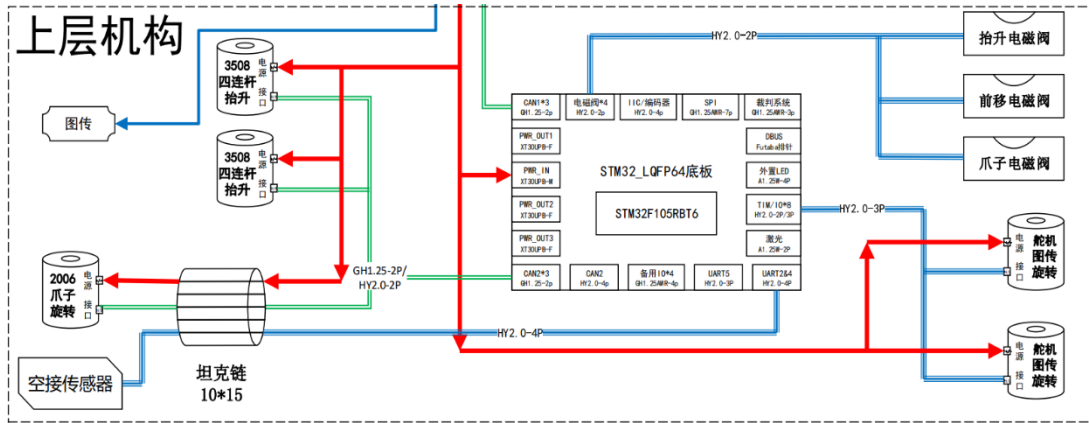


图 4.4.2.1 工程上层硬件框图

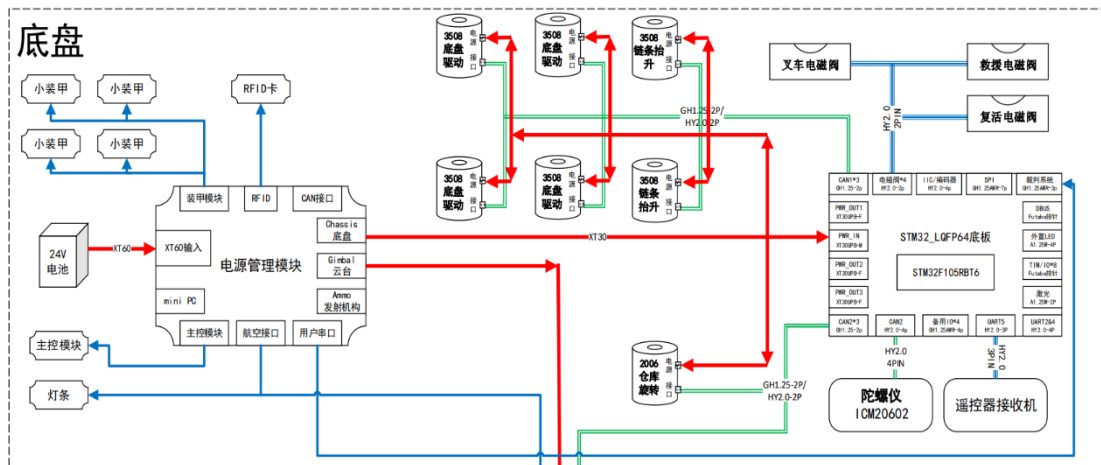


图 4.4.2.2 工程底盘硬件框图

4.4.2.2 硬件详细设计

1、整体概述

2021 年的工程机器人整体由底盘与上层机构两个部分组成，两者之间的控制相互独立。整辆工程车通过 18*18mm 的坦克链连接底盘和上层机构，坦克链为上层机构提供电源、气源并为底盘和上层机构之间提供通信。

整车中相对的设计难点在于三点：一是通过 2 个舵机实现的位于最上层的图传模块的角

度控制信号传递，二是图传模块和最底层的电源管理模块之间的信号传递，三是爪子前移、开合的电路和气路设计。

2、底盘部分

根据工程机器人需求，底盘主控板集成底盘电机控制、裁判系统通信、云台通信及电磁阀控制部分，为实现底盘完整功能，单片机搭载两个 CAN 收发器以满足 CAN 通信需求。陀螺仪独立于主控板外，搭载其他单片机主控，与主控板间使用 CAN 通信。陀螺仪固定在底板上。电磁阀主要使用三极管进行通断电工作。

3. 云台部分

云台主要由 Gimbal 供电。通过电机及电磁阀等进行抬升或四连杆伸缩。主控内单片机均由开关电源搭配 LDO 进行 3V3 供电，外设如遥控接收机、陀螺仪、激光均由过流更大的开关电源供电。

4.4.2.3 关键器件的选型

工程电路的关键器件选型如下表 4.4.2.1 所示。

表 4.4.2.1 工程关键器件选型表

器件类型	选型
主控芯片	STM32F105RBT6、STM32F405RGT6;
24V 转 5V 稳压	MP2482、MP2451
5V 转 3V3 LDO	SPX3819M5-3.3L
TVS	SMBJ24A, SMAJ26A
双路电源选择芯片	LTC1473
USB 转串口芯片	CP2102
CAN 收发器	TCAN33x, MAX3051
MOS	CSD18543, CSD18532, AO3400, AO3401, SS8050, SS8550

陀螺仪	ICM20602, QMC5883L
晶振	8MHZ, 3225/5032 封装
二极管	IN5819, 1N4007, 1N4148, SS54

4.4.3 重要传感器选型说明

1. 使用 K210 板子与双目相机配合使得操作手能够清楚地看到取矿的情况，便于了解当前取矿的状态，从而做出灵活的调整，同时还能进行视觉识别准确判断出目标矿石具体的位置
2. 使用陀螺仪 STIN T0-TTL 安装在四连杆上，使得四连杆的角度能够即时反馈，便于调整至不同的角度完成四连杆驱动的不同操作
3. 使用微动开关准确控制位移变化，通过增加位移的判据，减小了位移的误差
4. 空接采用漫反射型的传感器 TOF050，当矿石落到传感器的感应区域时，传感器发出信号光束被矿石反射给接收端，迅速传递信号控制爪子夹紧完成空接矿石的操作

4.4.4 软件设计

4.4.4.1 软件方案

在设计机械结构的同时使用 `coppiliasim` 仿真，根据仿真结果得到结果论证方案的可行性。

设计软件架构时综合考虑外部系统接口、用户界面的设计以及逻辑实现和数据存储，采用 FreeRTOS 操作系统实现多任务控制，使用团队统一的通讯协议来实现代码的可移植性。底盘为主板，需要控制多个电机、救援模块和复活模块的气缸、与上层之间的通讯、与裁判系统和遥控器的通讯，需要用到 CAN 通讯、IO 口、USART 通讯、I2C 等外设。需要用到的 FLASH 大小在 100KB 左右即可，算力方面 F105 要强于 F103，而使用 F405 又会使算力显得冗余，故使用 STM32F105 板作为主控电路板。上层需要考虑到视觉识别，而 K210 的 400MHz+8MB 的配置足以实现工程车的 AI 解算，而 K210 板的引脚配置可以很好地实现上层模块的控制以及和底盘的通讯，因此选用 K210 板来控制上层再好不过。

软件测试和调试首先在仿真环境中进行，确保代码逻辑的合理性，以免去上车调试时的各种问题；然后使用单片机从下到上依次单独控制各个模块，确保每个模块能够正常运行；最

后进行各模块的联调工作，同时测试机械和电路的设计是否合理和正常工作。

工程的反转矿石功能曾考虑过使用滚轮直接对矿石进行反转，但是考虑到空间占用较大等原因，没有使用该方案；上层考虑过使用 F103 板+K210 控制，因为 K210 没有 CAN 通讯，但是考虑到两个板子的功能过于冗余，决定使用 K210 单板控制上层，另加 CAN-TTL 模块来实现电机控制。

4.4.4.2 重点功能

底盘功率限制功能：虽然工程在比赛规则中没有对底盘功率进行限制，但是如果底盘整体电流过大电源管理模块会自动切断电源，导致工程车在场上突然断电。所以在代码中依旧有着对工程车底盘电流大小的限制。

控制平滑化多元化：如果是采用阶跃函数的形式对电机进行控制，无论是上层还是底盘，都可能会存在一定的问题。以底盘举例，阶跃函数的启停控制，不但可能会使轮子出现打滑的现象，还很大概率会出现大幅度超功率耗尽缓存能量。因此，我们在对于阶跃函数形式的控制信号，我们都采用了简单方便实现的斜坡函数来对信号平滑化处理。同时底盘有两套参数进行控制，使工程在取矿的对准过程中稳定精确的移动，同时在掩护队友的时候能展现出充分地机动性。

离线检测功能：为了避免 IMU 或者电机等模块通信短线导致的机器人失控等危险情况的发生，提高系统的安全性。我们通过 FreeRTOS 提供的 API 来获取每次电机或者是 IMU、PC、遥控器等更新数据时间，然后在一个固定频率运行的任务中对这些数据更新状态进行处理。若是超过一定时间，模块数据没有更新，则认为该模块离线，立即挂起与该模块有关的任务，避免异常工作造成危险。当模块再次检测到的时候，则恢复任务的正常运行。极大的提高了安全性和调试时对模块离线快速判断的速度。

4.4.5 算法设计

工程车主要的算法需求在于取矿时成功识别并对齐矿石，由于取矿时场景单一且相对稳定，通过视觉方案对齐的效果好于人工对齐，而且算法复杂度不高，采用搭载 K210 芯片的 MAIX DOCK 开发板和双目摄像头的方案实现。前期采集大量取矿时的摄像头图片作为数据集，训练出能够高准确率识别矿石的 yolov2 模型，将实时采集的图片传入神经网络后可得出

图片中矿石的二维位置，再通过双目摄像头测距算法得出矿石相对于工程车的相对位置，进而实现工程车对其矿石。

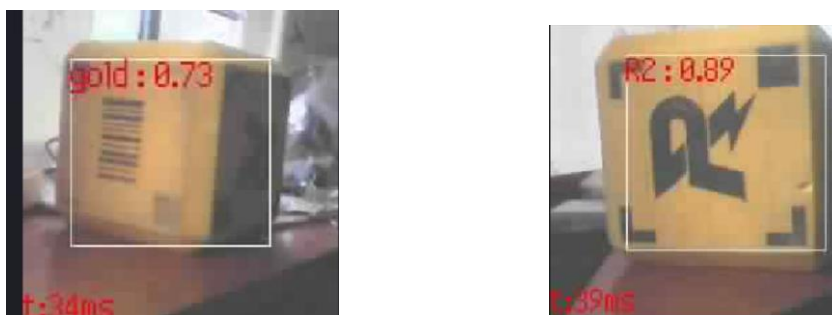


图 4.4.5.1 识别金矿效果图

4.5 研发迭代过程（10）

4.5.1 版本迭代过程记录

表 4.5.1 工程机器人版本迭代记录表

版本号或阶段	功能或性能详细说明	完成时间
v1.0	实现大小资源岛取矿，复活救援	2022.1.7
V1.1	修改二级抬升	2022.1.12
V2.0	增加 pitch 轴转矿和移动障碍块的机构（叉车）	2022.5.15
v2.1	增加基于舵机的二维云台	2022.5.25
v2.2	增加矿石仓库 yaw 轴转矿 增加叉车力矩	2022.5.29
v2.3	增加固定四连杆齿轮距离定位板，加强四连杆运作稳定性	2022.6.3
v3.0	增加全部的电路防护以及气瓶快拆	2022.6.5

4.5.2 重点问题解决记录

表 4.5.2 工程机器人重点问题记录表

重点问题	解决记录
救援和前装甲板连接在同一根铝管上，救援时装甲板会识别成为小弹丸导致自杀	把前装甲板连接到矿石仓库的支撑架上之后问题得到解决
矿石兑换时前伸距离较短，不能快速对矿石进行兑换	在上层夹爪出增加一个 CDJ2B10-100 的气缸，可以稳定的对矿石进行兑换
上层四连杆由于宽度限制出现较大干涉问题	更改使用螺钉并且重新设计连接板增加四连杆的宽度，
矿石仓库高度问题会导致取第二颗矿石的时候夹爪会碰到矿石	通过软件控制逻辑先使用二级抬升解决了此问题

4.6 团队成员贡献

表 4.6.1 工程机器人团队成员贡献记录表

姓名	基本信息 (专业、年级、队内角色)	主要负责工作内容描述	贡献度 (所有成员贡献度合计为 100%)
陈劲元	能源与动力学院、大二、项目组组长	摸鱼	20%
吴培诚	电子信息工程、大二、工程机械组成员	负责工程底盘和辅助模块	20%
祝科伟	电子信息工程、大二、工程嵌软组成员	负责整个过程嵌入式开发，包括取矿逻辑	20%
胡洪策	微电子、大三、电路组组长	工程车电路板设计、布线以及维修	20%
张乐	机械工程、大四、技术顾问	提供解决问题的方案，时间安排以及指导	20%

4.7 参考文献

表 4.7.1 工程机器人团队成员贡献记录表

参考文献	收获点分析
德州仪器高性能模拟器件高校选型指南之电源	学会电源选型知识
德州仪器高性能模拟器件高校选型指南之运算放大器	学会运算放大器选型知识
STM32F10X 硬件开发使用入门	学会单片机硬件开发
硬石电机控制专题指导手册	学会电机控制
Getting started with STM32F4xxxx MCU hardware development	学习单片机硬件部分
北京理工大学机械开源	学习四连杆结构与滚吸结构
东大机械开源	学习吸盘结构
Maixpy 学习网站	学习使用 k210 板学习视觉

5. 空中机器人

5.1 其它学校空中机器人分析综述（2.5）

5.1.1 无人机选型

无人机对机架刚度要求很高，固定无人机主要结构都使用碳纤维板为材料机身碳板要保证强度的同时尽可能的减重镂空可以使用应力分析+拓扑优化。无人机机身采用多层碳板作为主体，在碳板之间使用铝柱进行连接加固，机臂管架通过加工件垫在碳板之间，保证板间距有较高的精度。机臂使用碳纤维管，无人机对机臂上孔位的垂直度要求很高，如果孔位垂直度不够，会导致螺旋桨平面有偏转角度，会导致动力损失，影响飞机平衡性能。起落架采用类似 M600 的起落架，固定在机身上，优点是做的更轻，缺点是会影响云台射界。

5.2 机器人功能定义（5）

表 5.2.1 空中机器人功能定义表

步兵	功能需求	需求分析/量化指标
飞控	定高状态下不会出现炸机	避免出现炸机导致灾难性后果
	稳定性强	使用 DJI 成品 N3 飞控
云台	角度控制	保证射击稳定，100 发弹丸 5 米命中率 100%
武器系统	射击系统稳定	不出现卡弹，500 发卡弹率为 0
	具备辅助瞄准功能	辅助提高瞄准精度

5.3 机器人核心参数（2.5）

表 5.3.1 空中机器人主要核心参数表

参数	描述
尺寸（长宽高）	145cm×145cm×77cm
最大工作电压	48V
电机数目与用途	GM6020×2：云台 Pitch 与 Yaw 轴驱动 RM2006×3：摩擦轮及拨盘驱动
重量	15.6kg

5.4 设计方案（25）

5.4.1 机械结构设计

5.4.1.1 整体设计、核心结构设计说明

（一）机架部分

无人机机身采用多层碳板作为主体，在碳板之间使用铝柱进行连接加固，机臂管架通过加工件垫在碳板之间，保证板间距有较高的精度。机臂使用碳纤维管，无人机对机臂上孔位的垂直度要求很高，如果孔位垂直度不够，会导致螺旋桨平面有偏转角度，会导致动力损失，影响飞机平衡性能。起落架采用类似 M600 的起落架，固定在机身上，优点是可以做的更轻，缺点是会影响云台视界。

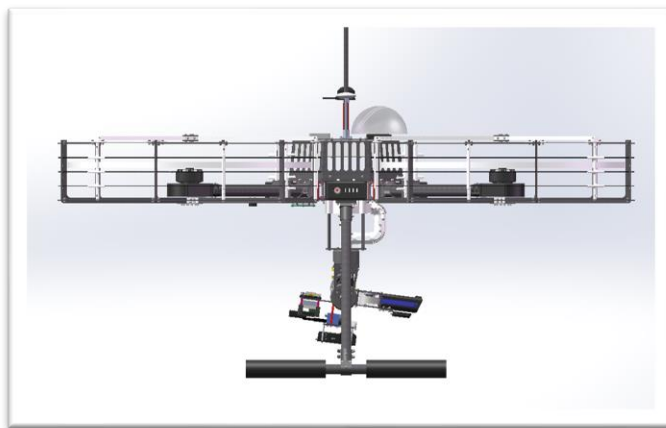


图 5.4.1 无人机机架结构

（二）发射结构部分

无人机云台主要结构与哨兵类似，但是由于无人机基本不会被近距离的流弹攻击，所以防护上只会对部分电路部分进行简单的防护。发射机构使用两个 M2006 无刷电机带动摩擦轮实现小弹丸发射。

弹仓采用上弹仓对于多旋翼无人机，其重心越靠近螺旋桨平面，其稳定性越高。同时由于无人机保护罩的存在对其余补弹方式影响较大，而上弹舱能更加轻松的将弹丸放入弹舱内部。但是上弹仓的缺点是供弹链路的管道会很长且多弯折，管道阻力较大。

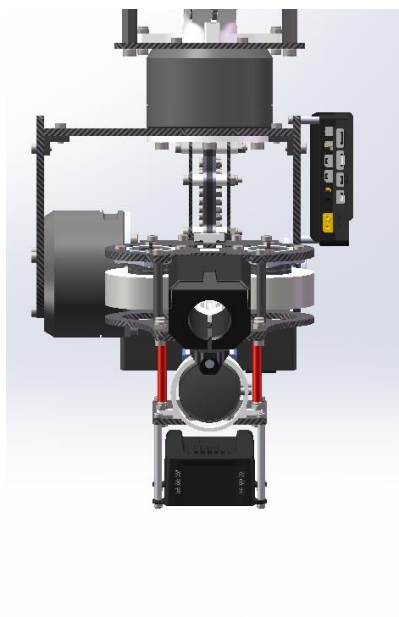


图 5.4.2 发射机构

5.4.1.2 主要零部件工艺选择

我们的主要零部件的材料及加工方式如下表 5.4.1.1 所示。

表 5.4.1.1 无人机主要零件材料及加工方式表

零件名	材质	加工方式
拨盘	PLA	3D 打印
弹舱	PLA	3D 打印
电路板滑轨	PLA	3D 打印
滑槽连接件	PLA	3D 打印
6020 电机联轴器	6061 合金	CNC
pitch 连接件	6061 合金	CNC

避震器	6061 合金	CNC
底盘联动转轴	6061 合金	CNC
联轴器压片	45 碳钢	CNC
轮组加工件	6061 合金	CNC
摩擦轮固定座	6061 合金	CNC
四孔转接件	6061 合金	CNC
云台架底座	6061 合金	CNC
转轴连接件	6061 合金	CNC
6020 垫板	环氧	雕刻
弹舱 pc 板	PC	雕刻
底盘传动杆	玻纤	雕刻
底盘联动板	玻纤	雕刻
底盘中板	玻纤	雕刻
底盘装甲支撑	玻纤	雕刻
管道轴承约束板	玻纤	雕刻
云台承重板	玻纤	雕刻
云台固定板	玻纤	雕刻
6020 定子固定座	聚甲醛	铣削

5.4.2 硬件设计

5.4.2.1 整机硬件框图

无人机硬件框图如下图所示。

图 5.4.2.1 上层无人机硬件框图示意图

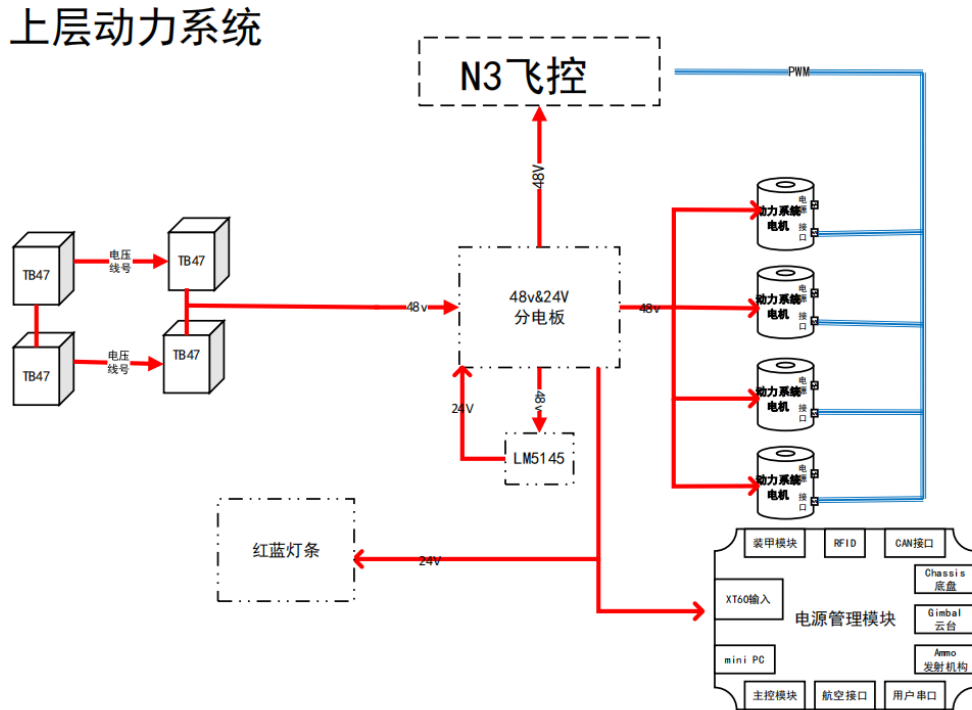
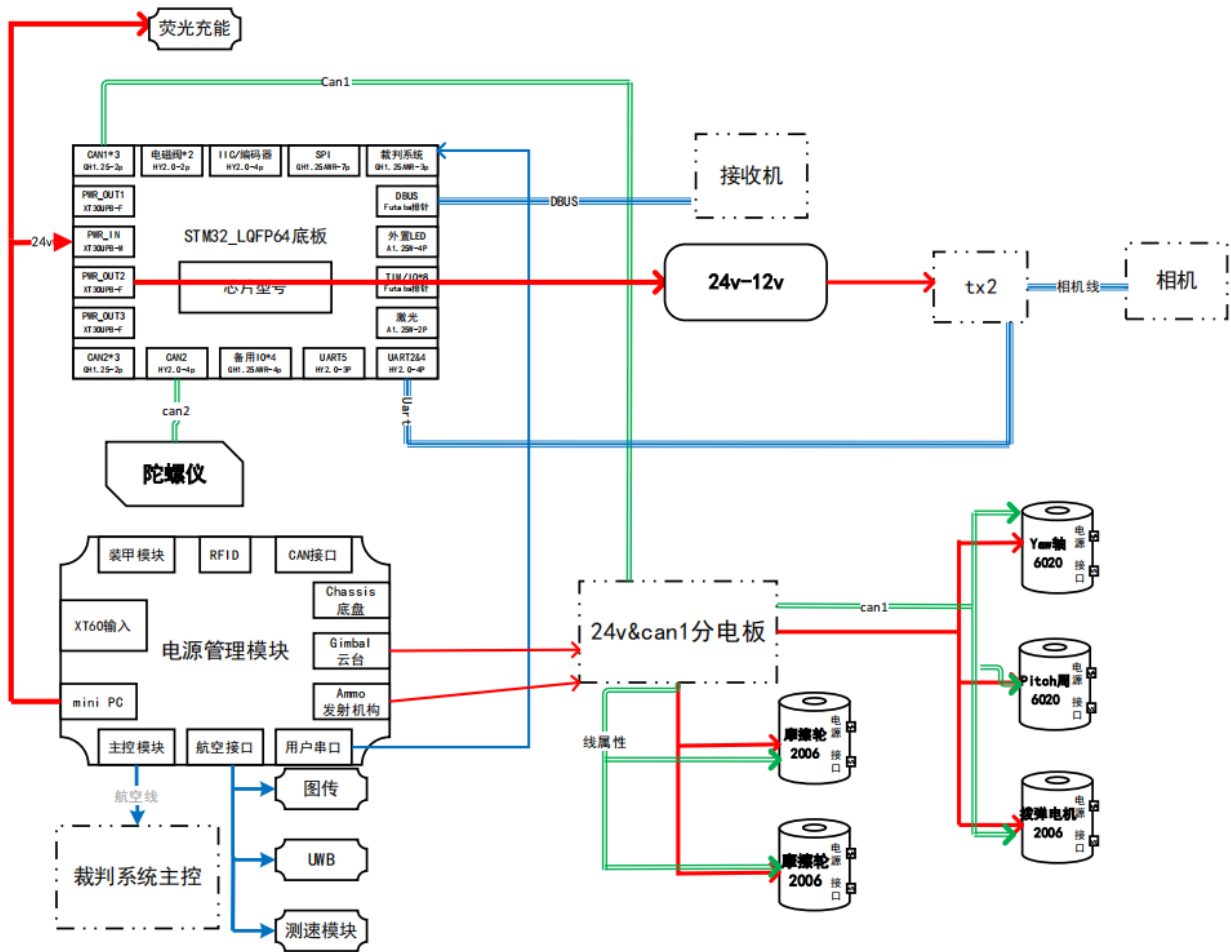


图 5.4.2.1 上层无人机硬件框图示意图



5.4.2.2 硬件详细设计

(一) 上层部分

根据无人机需求，电池 48v 给 N3 飞控和旋翼电机供电,通过分电板降压 24v 给下层云台以及裁判系统供电。

(二) 云台部分

云台供电分为 Gimbal、Ammo、MiniPC 三个部分，其中摩擦轮和拨弹电机均由 Ammo 供电，Pitch 和 Yaw 轴电机及荧光充能模块由 Gimbal 供电，弹仓盖舵机由 Gimbal 接 24V 转 5Vbuck 电路供电， MiniPC 口经 24 转 12V 后再给 TX2 和云台主控板供电。主控内单片机仍由开关电源搭配 LDO 供电，其他外设如遥控接收机、陀螺仪、激光均由过流更大的开关电源供电。陀螺仪独立于主控板外，搭载其他单片机主控，与主控板间使用 CAN 通信。主控板与 TX2 之间配上自研 USB 转串口模块使用串口通信。

5.4.2.3 关键器件的选型

关键器件选型如下表 5.4.2.1 所示。

表 5.4.2.1 无人机关键器件选型表

器件类型	选型
主控芯片	STM32F405RGT6、STM32F042F6P6;
24V 转 5V 稳压	MP2482、MP2451
5V 转 3V3 LDO	SPX3819M5-3.3L
TVS	SMBJ24A, SMAJ26A
CAN 收发器	TCAN33x, MAX3051
MOS	CSD18543, CSD18532, AO3400, AO3401, SS8050, SS8550
陀螺仪	ICM20602, QMC5883L
晶振	8MHZ, 3225/5032 封装
二极管	IN5819, 1N4007, 1N4148, SS54

5.4.3 软件设计

5.4.3.1 系统架构

(一) 无人机

云台系统主控芯片为 STM32F405RG，其承载无人机的云台操作任务，包含云台的 Yaw,Pitch 轴电机、拨弹电机、摩擦轮等电机控制，负责枪管的朝向的调整、射击任务逻辑控制、底盘速度控制等无人机整体控制中心。

系统使用了 FreeRTOS 操作系统来规划调度各个任务的运行，同时保证任务的完成与大量信息的通信的流畅，合理利用单片机资源，并且为了增加系统的鲁棒性，我们部署了看

门狗来实时监测各任务的运行。

在调试过程中，皆以 Jlink 作为调试器，使用 Jscope 实时显示数据波形，远程时则使用 VOFA 利用蓝牙模块进行远程调试看波形图，利用 Keil5 的 debug 功能调整参数与逻辑（Windows 10 64 位，MDK5.29 版本，J-linkv8）。利用 Keil5 编译完成代码，通过 Jlink 下载器下载入单片机芯片内，上电即可运行任务。另外依靠正点原子的无线调试器来调整底盘运动中功率的变化和缓冲能量的使用率。我们还将程序分为初始化硬件模块与逻辑应用模块,实现分层设计,避免两者相互干扰,并且便于后续调试。

5.4.3.2 运行流程

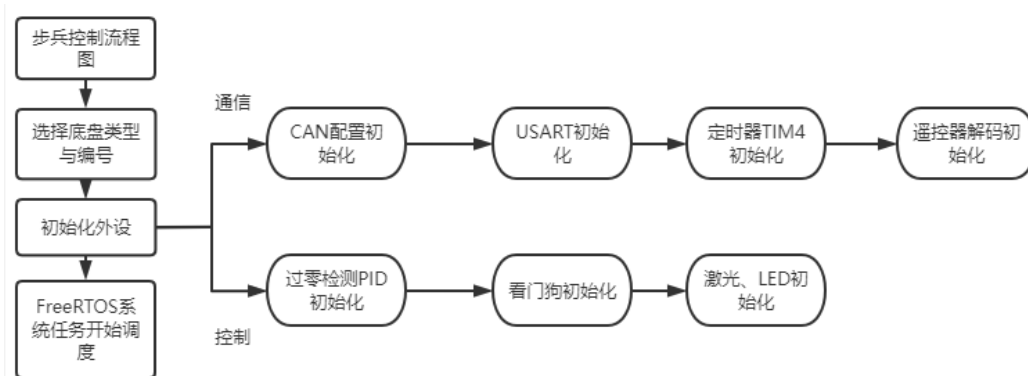


图 5.4.3.1 无人机初始化流程

首先上电后，主控芯片执行上图 5.4.3.1 的流程，会初始化所有外设设备，接着开始 FreeRTOS 的系统调度，持续接受控制信息。

无人机的总体控制流程如下。首先进行各个硬件模块的初始化，如 CAN 通信、USART 通信、编码器采集、定时器配置与看门狗初始化配置等，接着无人机将持续接受外界遥控器的控制信息，当云台系统任务捕获到控制信息后，对其做出反应，包含云台运动、底盘运动以及射击三大部分，由于云台运动为射击任务服务，因此我们也将射击任务归到云台任务中。总体控制持续监测完成控制需求。

在机器人内部两大系统间的通信主要依靠 CAN 通信，云台系统向底盘系统发送速度的期望，底盘反馈云台实时底盘状态信息。

云台系统内，主控板分别接受 6020 云台 Pitch、Yaw 轴电机、摩擦轮电机、拨弹电机以及弹舱盖舵机来反馈根据控制需求传输控制信息，并接受陀螺仪位姿信息校准云台姿态。

在除此之外，会有裁判系统以及控制部分发来的信息，机器人接受控制解算来做出相应的运动与任务，接受裁判系统信息来设置车体的一些参数与获取战场的信息。

5.4.3.3 重点功能

控制平滑化：如果是采用阶跃函数的形式对电机进行控制，无论是云台还是底盘，都可能存在一定的问題。以底盘举例，阶跃函数的启停控制，可能会出现主控板降压芯片烧毁，自取灭亡的行为。因此，我们在对于阶跃函数形式的控制信号，我们都采用了简单方便实现的斜坡函数来对信号平滑化处理。

底盘控制模式切换：提供基于键盘按键的模式切换功能，可以实现机器人发射模式切换等功能，保证了场上控制安全性便于日常测试。

离线检测功能：为了避免 IMU 或者电机等模块通信短线导致的机器人失控等危险情况的发生，提高系统的安全性。我们通过 FreeRTOS 提供的 API 来获取每次电机或者是 IMU、PC、遥控器等更新数据时间，然后在一个固定频率运行的任务中对这些数据更新状态进行处理。若是超过一定时间，模块数据没有更新，则认为该模块离线，立即挂起与该模块有关的任务，避免异常工作造成危险。当模块再次检测到的时候，则恢复任务的正常运行。极大的提高了安全性和调试时对模块**离线快速判断**的速度。

5.5 研发迭代过程（10）

5.5.1 版本迭代过程记录

表 5.5.1 无人机版本迭代记录过程表

版本号或阶段	功能或性能详细说明	完成时间
V1.0	基础机架	2022.10.7
V2.0	下层云台底板重做,发射机构修改	2022.6.18

5.6 团队成员贡献（2.5）

表 5.6.1 无人机团队成员贡献表

姓名	基本信息 (专业、年级、队内角色)	主要负责工作内容描述	贡献度 (所有成员贡献度合计为 100%)
邵哲	环境工程、大四、项目组长	协调组内成员进度，督促研发任务计划的制定，监督任务完成情况；设计无人机的机械结构	25%
刘泽旭	光电类、大二、机械组成员	负责无人机的机械设计	25%
满春阳	船海工程，大三，硬件负责人	负责硬件开发、布局布线及日常维护调试	25%
葛昊骏	电子信息工程、大二、嵌入式软件负责人	负责无人机的嵌入式开发，包括云台控制等	25%

6. 飞镖系统

6.1 其它学校飞镖机器人分析综述（2.5）

6.1.1 发射架选型

底盘采用餐盘轴承形式,上下两层通过两侧圆盘连接,能增大上层对下层的接触面积,利于发射架发射时保持平衡,同时使用 M3508 电机以齿条形式调整角度,能实现角度的精确调整。

发射机构使用四个 M3508 无刷电机带动摩擦轮实现飞镖发射,发射架摩擦轮与飞镖两侧的摩擦块进行摩擦,给飞镖提供发射初速度,可以使飞镖发射动力最大程度作用于重心,防止飞镖发射过程中受力不均导致发射时姿态不利。同时飞镖底部与发射架导轨有导向装置对飞镖发射姿态进行限位。

飞镖本赛季采用发泡材料打印,做到轻量化,也考虑到赛场其他车辆的碾压,重要电子零件做好保护措施,以及易损部位方便更换。发射架没有较大改动,依旧是常规尺寸和重量限制,需要稳定的状态保证飞镖发射初速度和状态的稳定。攻击目标分为前哨战和基地,因此 YAW 和 PITCH 也需要精准控制,以及 25-45 角度调整的机械限位。

6.2 机器人功能定义（5）

表 6.2.1 飞镖功能定义表

飞镖	功能需求	需求分析/量化指标
发射架	pitch 轴调节	稳定调节 pitch 角度
	yaw 轴调节	稳定调节 yaw 角度
	发射飞镖	给飞镖提供初速度

6.3 机器人核心参数（2.5）

表 6.3.1 飞镖主要核心参数表

参数	描述
尺寸（长宽高）	58.5cm×48.8cm×47.1cm
最大工作电压	24V
电机数目与用途	M3508×5：底盘驱动与摩擦轮驱动 RM2006×1：丝杆驱动

6.4 设计方案（25）

6.4.1 机械结构设计

6.4.1.1 整体设计、核心结构设计说明

（一）底盘部分

底盘采用餐盘轴承形式,上下两层通过两侧圆盘连接,能增大上层对下层的接触面积,利于发射架发射时保持平衡,同时使用 M3508 电机以齿条形式调整角度,能实现角度的精确调整。



图 6.4.1 发射架底盘

（二）飞镖与发射结构部分

发射机构使用四个 M3508 无刷电机带动摩擦轮实现飞镖发射,发射架摩擦轮与飞镖两侧的摩擦块进行摩擦,给飞镖提供发射初速度,可以使飞镖发射动力最大程度作用于重心,防止飞镖发射过程中受力不均导致发射时姿态不利。同时飞镖底部与发射架导轨有导向装置对飞镖发射姿态进行限位。

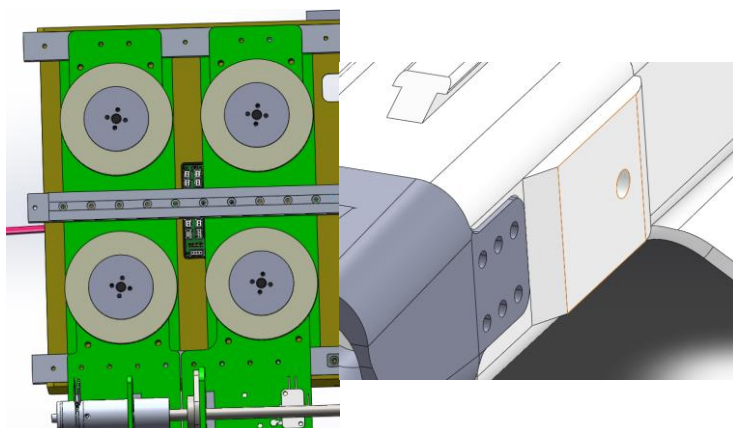


图 6.4.3 飞镖摩擦块

图 6.4.2 四摩擦轮结构

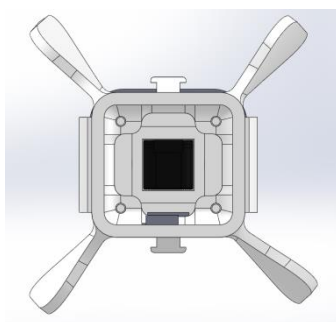


图 6.4.4 飞镖限位结构

6.4.1.2 主要零部件工艺选择

我们的主要零部件的材料及加工方式如下表 1.4.1.1 所示。

表 6.4.1.1 飞镖主要零件材料及加工方式表

零件名	材质	加工方式
电路板滑轨	PLA	3D 打印
滑槽连接件	PLA	3D 打印
pitch 连接件	6061 合金	CNC
底盘联动转轴	6061 合金	CNC
联轴器压片	45 碳钢	CNC
轮组加工件	6061 合金	CNC

摩擦轮固定座	6061 合金	CNC
四孔转接件	6061 合金	CNC
转轴连接件	6061 合金	CNC
底盘传动杆	玻纤	雕刻
底盘联动板	玻纤	雕刻
底盘中板	玻纤	雕刻
云台承重板	玻纤	雕刻
云台固定板	玻纤	雕刻
底盘铝框框架	铝管	金属切割
底盘外框防护	铝管	金属切割

6.4.2 硬件设计

6.4.2.1 整机硬件框图

飞镖硬件框图如下图所示。

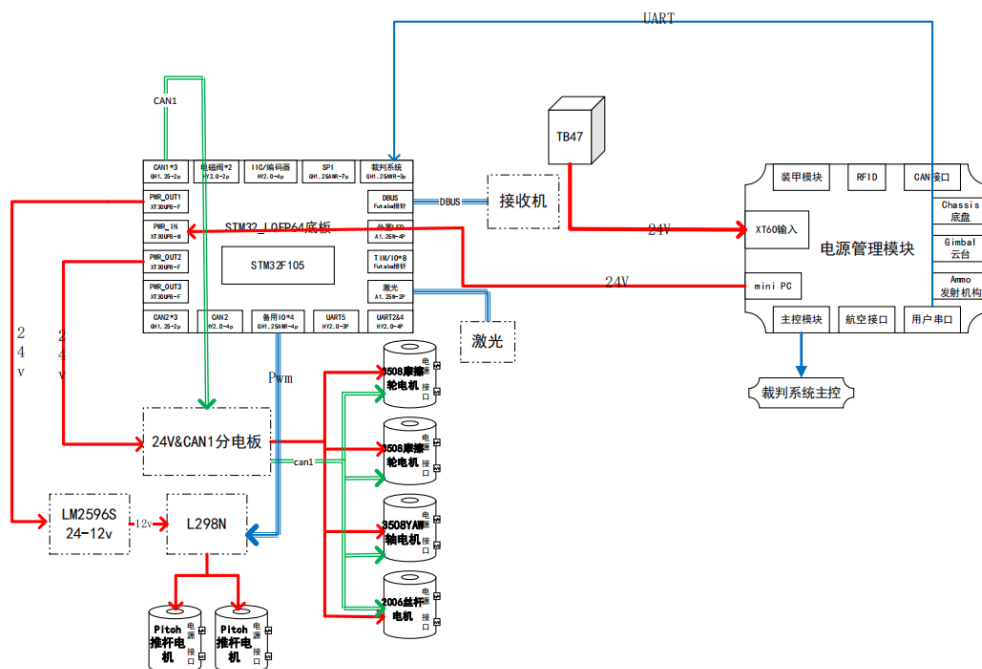


图 6.4.5 飞镖整机硬件框图

6.4.2.2 硬件详细设计

(一) 发射架部分

根据飞镖发射架需求，主控板集成底盘电机控制、裁判系统通信及云台通信部分，为实现底盘完整功能。给单片机系统供电部分先由开关电源将电压降到 5V，再用 LDO 去除开关电源产生的噪声并降压到 3.3V 给单片机供电。单片机搭载两个 CAN 收发器以满足 CAN 通信需求。

(二) 飞镖部分

使用降压电路,将电池 7.4v 转为飞镖触发模块 5v 供电。

6.4.2.3 关键器件的选型

表 6.4.2.1 飞镖关键器件选型表

器件类型	选型
主控芯片	STM32F105RBT6
24V 转 5V 稳压	MP2482、MP2451
5V 转 3V3 LDO	SPX3819M5-3.3L
TVS	SMBJ24A, SMAJ26A
CAN 收发器	TCAN33x, MAX3051
MOS	CSD18543, CSD18532, AO3400, AO3401, SS8050, SS8550
陀螺仪	ICM20602, QMC5883L
晶振	8MHZ, 3225/5032 封装
二极管	IN5819, 1N4007, 1N4148, SS54

6.4.3 软件设计

6.4.3.1 系统架构

(一) 发射架

发射架的主控芯片为 STM32F105RB，其承载发射架的底盘操作任务以及裁判系统通信等等功能，是机器人移动的控制中心。

两大系统都使用了 FreeRTOS 操作系统来规划调度各个任务的运行，同时保证任务的完成与大量信息的通信的流畅，合理利用单片机资源，并且为了增加系统的鲁棒性，我们部署了看门狗来实时监测各任务的运行。

在调试过程中，皆以 Jlink 作为调试器，使用 Jscope 实时显示数据波形，远程时则使用 VOFA 利用蓝牙模块进行远程调试看波形图，利用 Keil5 的 debug 功能调整参数与逻辑（Windows 10 64 位，MDK5.29 版本，J-linkv8）。利用 Keil5 编译完成代码，通过 Jlink 下载器下载入单片机芯片内，上电即可运行任务。另外依靠正点原子的无线调试器来调整底盘运动中功率的变化和缓冲能量的使用率。我们还将程序分为初始化硬件模块与逻辑应用模块,实现分层设计,避免两者相互干扰,并且便于后续调试。

6.4.3.2 运行流程

首先上电后，主控芯片会初始化所有外设设备，接着开始 FreeRTOS 的系统调度，持续接受控制信息。

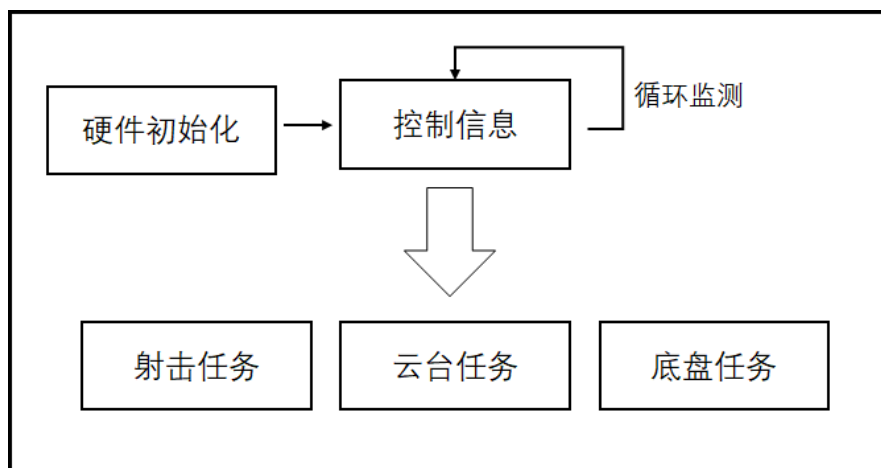


图 6.4.3.2 飞镖总体控制框架

飞镖发射架的总体控制流程如图 6.4.3.2，首先进行各个硬件模块的初始化，如 CAN 通信、USART 通信、编码器采集、定时器配置等，接着飞镖发射架将持续接受外界遥控器的控制信息，当云台系统任务捕获到控制信息后，对其做出反应，包含云台运动、底盘运动以及射击三大部分，由于云台运动为射击任务服务，因此我们也将射击任务归到云台任务中，

最后结算完成驱动电机。总体控制持续监测完成控制需求。

在机器人内部两大系统间的通信主要依靠 CAN 通信，云台系统向底盘系统发送速度的期望，底盘反馈云台实时底盘状态信息。

云台系统内，主控板分别接受云台 Pitch、Yaw 轴电机、摩擦轮电机、拨弹电机来反馈根据控制需求传输控制信息，并接受陀螺仪位姿信息校准云台姿态。

底盘系统内，控制主板接受电机的反馈来控制电机，并根据云台的需求控制陀螺仪信息校准飞镖发射架姿态。

在除此之外，会有裁判系统以及控制部分发来的信息，机器人接受控制解算来做出相应的运动与任务，接受裁判系统信息来设置飞镖发射架的一些参数与获取战场的信息。

1.4.3.3 重点功能

控制平滑化：如果是采用阶跃函数的形式对电机进行控制，无论是云台还是底盘，都可能会存在一定的问题。以底盘举例，阶跃函数的启停控制，可能会出现主控板降压芯片烧毁，自取灭亡的行为。因此，我们在对于阶跃函数形式的控制信号，我们都采用了简单方便实现的斜坡函数来对信号平滑化处理。

底盘控制模式切换：提供基于键盘按键的底盘模式切换功能，可以实现机器人发射模式切换等功能，保证了发射架便于日常测试。

6.5 研发迭代过程（10）

6.5.1 版本迭代过程记录

表 6.5.1 飞镖版本迭代工程记录表

版本号或阶段	功能或性能详细说明	完成时间
V1.0	两摩擦轮发射架	2021.10.7
V2.0	改为四摩擦轮发射架,飞镖主题添加摩擦块	2022.7.8

6.6 团队成员贡献（2.5）

姓名	基本信息 (专业、年级、队内角色)	主要负责工作内容描述	贡献度 (所有成员贡献度合计为 100%)
付欣宇	集成电路设计与集成系统、大三、项目组长	协调组内成员进度，督促研发任务计划的制定，监督任务完成情况；设计平衡步兵的机械结构	25%
熊宇琳	船舶与海洋工程、大三、机械组成员	负责发射架的设计	25%
满春阳	船舶与海洋工程，大三，硬件负责人	负责硬件开发、布局布线及日常维护调试	25%
葛昊骏	电子信息工程、大二、嵌入式软件负责人	负责整个平衡步兵机器人的嵌入式开发，包括底盘控制、云台控制等	25%

6.7 参考文献（2.5）

参考文献	收获点分析
https://bbs.robomaster.com/forum.php?mod=viewthread&tid=12206	官方论坛开源
https://bbs.robomaster.com/forum.php?mod=viewthread&tid=12206	官方论坛开源
https://bbs.robomaster.com/forum.php?mod=viewthread&tid=12206	官方论坛开源
https://bbs.robomaster.com/forum.php?mod=viewthread&tid=12206	官方论坛开源
https://www.ti.com.cn/cn/lit/pdf/zhca041	学习开关电源的升压降压电路
https://bbs.robomaster.com/forum.php?mod=viewthread&tid=9407&fromuid=39845	获取裁判系统相关机械 3D 模型

7. 雷达

7.1 其它学校雷达分析综述

已实现雷达站的学校大多能够借助雷达站为操作手提供小地图信息，并实现一定程度的自动决策。但各学校间雷达站视域、目标检测精度、决策能力、交互功能存在明显差距。雷达站在战场上并非起决定性作用，但优秀的功能依然可以为队伍起到明显的辅助作用。

7.2 机器人功能定义

7.2.1 战场视野

雷达的基本功能是通过相机和各种传感器获取图像及距离等信息，为云台手提供视野和监视信息。在此基础上，图像信息也为后续目标检测等操作提供基础，以便为地面机器人操作手提供更多的位置信息。

7.2.2 目标检测

借由运算平台支持，雷达可以通过处理获取的图像信息实现对敌方车辆的识别和定位。该功能可以通过操作手 UI 提供实时的小地图信息，此外还将为雷达站自动分析和决策提供基础。

7.2.3 辅助决策

雷达俯视战场，其运算平台可获取较大范围内敌方车辆位置信息和裁判系统信息，通过分析这些信息可以进行一定程度的自动决策，包括为操作手提供预警信息以及辅助操作手进行战术选择。

表 7.2.1 雷达机器人功能定义表

模块	功能需求	需求分析/量化指标
相机	目标检测分辨率要求	能够 1080P 以上的分辨率，保证目标检测的准确度
	减少动态模糊	保证相机帧数在 30FPS 以上，保证目标检测稳定性
	深度获取功能	具有深度获取功能
运算平台	算力保证帧率	保证精度足够的目标检测模型运行时精度满足要求
其他	预警功能	在敌方机器人进入指定区域时能发出预警
	与其他机器人交互	与哨兵机器人等进行交互，完成特定功能

7.3 机器人核心参数

雷达站技术参数如下：

表 7.3.1 雷达运算平台端参数表

参数	描述
功率	500W
供电电压	220V
供电频率	50Hz
重量	15.5kg
外形尺寸	100*100*1500

7.4 设计方案

7.4.1 雷达相机选型

RM 赛场上雷达通常使用单目工业相机进行目标检测，并结合深度相机或激光雷达进行深度的获取。单目工业相机、深度相机与激光雷达的成本都较为高昂。考虑到当前规则下，雷达的主要作用集中在世界坐标获取和预警这两项。在操作手经验足够丰富，沟通足够及时的情况下，雷达本身的战略意义相比其余技术组并非至关重要。故我们考虑使用成本较低的 ZED 双目相机来满足对视觉信息与深度信息的获取。

ZED 相机是 Stereolabs 公司旗下的一款双目 3D 相机，具有高品质的 RGB 传感器，较低的延迟，以及完整的配套 SDK。在 NVIDIA 的 GPU 下，仅需要 CUDA 与 CUDNN 即可调用其通过视差获取的点云矩阵，在简单的相机坐标变换后即可得到世界坐标。

相比起价格高昂的 3D 激光雷达，采用双目相机进行深度获取虽在远距离的测距鲁棒性较差，但不需要对相机坐标与深度传感器坐标进行校正，一定程度上减少了开发的时间成本。在可接受的精度范围内，双目相机的性价比远超于 3D 激光雷达。

而对于单目工业相机而言，常使用 PNP 算法对深度进行求解。但在雷达站的长距离前提下，由于相机截断误差、像平面像素离散化、相机本身分辨率受限等原因，PNP 算法的表现并不好，在长距离下精度无法达到我们的预期。故最终权衡成本与精度要求，我们选择了双目相机作为雷达站的主要信息来源。

7.4.2 雷达运算设备选型

由于规则中的功率限制，车载运算平台不能使用高算力的显卡进行上位控制。但雷达站对

功率的限制较为宽松,且有市电 220V 的电压支持,可以使用 NVIDIA 系列的 GPU 进行运算。赛场上常出现的运算卡为 NVIDIA GTX1080 及 GTX1080Ti。本赛季我们使用了 NVIDIA GTX1060 支持目标检测功能中的高强度运算以及上面提到的 ZED 相机的点云计算。

除节省成本外,选择该显卡的另一原因是当前裁判系统串口协议中,小地图的发送频率限制为 10Hz,对帧数的要求相对较低。而在目标检测模型的准确度要求下,GTX1060 的算力能够支持 8 至 15Hz 的小地图刷新率,由于小地图信息每次仅能包含一辆敌方车辆,故实际需要的刷新率小于 5Hz,使用 GTX1060 已绰绰有余。

7.4.3 硬件设计

(一) 视觉以及深度信息获取

使用 ZED 双目相机获取视觉信息,安装相应的相机驱动后,将相机通过 USB 线连接至电脑,则可以通过 Stereolabs 公司开发的一系列应用程序进行相机的测试。其中可以选择的相机参数包括亮度、对比度、色调、饱和度、锐度、伽马值、白平衡、增益以及曝光时间,涵盖了大部分模拟域以及数字域的相机核心参数。



图 7.4.3.1 ZED 双目相机

另外该公司提供了完整的 Python 版 SDK,可以利用其给定的库函数编程,完成后续的目标检测和深度获取任务。

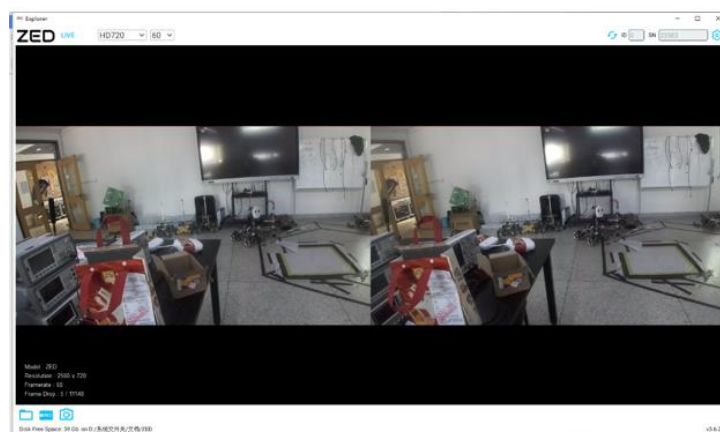


图 7.4.3.2 ZED 相机演示程序

（二）运算平台

本赛季使用的计算机为雷蛇（Razer）灵刃 15 笔记本，搭载了 Inter i7-8750H CPU，具有 6 核 12 线程，最高 4.1GHz 的处理能力。独立显卡为 NVIDIA 公司的 GTX 1060，具有 6GB 显存，能够支撑目标检测与 ZED 双目相机的点云运算。



图 7.4.3.3 雷蛇灵刃 15

（三）通信设备

在与裁判系统的通信中，主要通过安装了 CH340 芯片的串口异步通信模块，实现 USB 到 TTL 电平的转换，通过 Python 的标准 Serial 以及 Struct 库完成对串行数据的封装以及发送。



图 7.4.3.4 USB2TTL 模块

7.4.4 软件设计

7.4.4.1 系统架构

在雷蛇灵刃 15 笔记本中，使用 Windows 10 操作系统，搭配 VS Code 作为编辑器，使用

Python 进行开发。代码流程中的主要运算部分为点云图以及深度卷积神经网络的计算，在 NVIDIA 1060 中进行；其余的车辆与装甲板匹配、串口通信部分等对算力要求不高的部分则在 Intel i7-8750H 中完成。每次循环中完成对目标检测以及坐标预测后，将相应的坐标信息转化为小地图的串行信息，并通过 CH340 发送至裁判系统的电源管理模块，即可通过主控上传至服务器并广播至所有操作手端。

7.4.4.2 运行流程

(一) 初始化流程

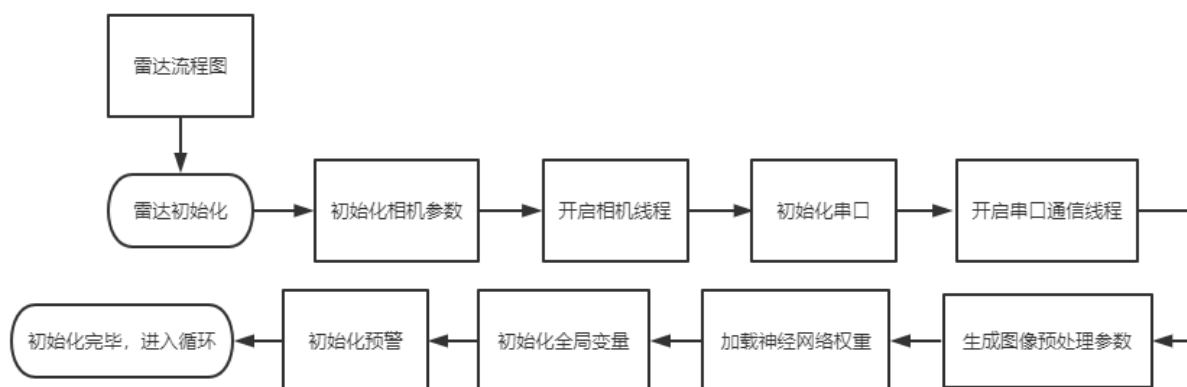


图 7.4.2.2 雷达初始化流程

上图为代码开始运行后，CPU 执行上图 7.4.2.2 的流程，初始化相机以及串口通信对象，并加载目标检测模型的权重以及一系列用于图像处理的参数等。在预警模式启动的情况下，将要求使用现场拍摄的图片框选出需要预警的图片区域。然后主线程中代码便进入循环，迭代处理相机传输的图片和深度图，生成小地图或预警数据。

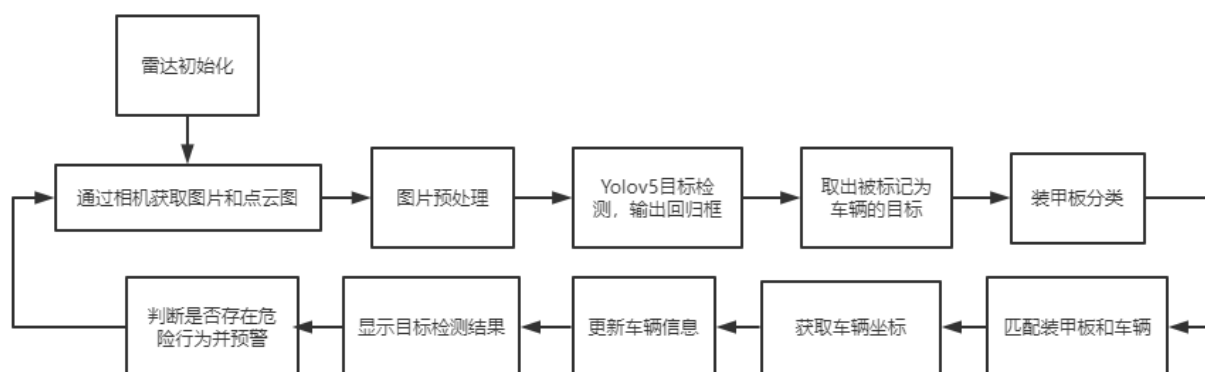


图 7.4.2.3 雷达主线程流程

雷达的总体控制流程如图7.4.2.3，在各模块的初始化结束后进入循环，通过相机线程获取像素图片及点云图，进行预处理后使用Yolov5-l模型进行目标检测，并输出回归框。将标记为车辆的目标取出后对识别到的装甲板进行分类，匹配装甲板与车辆，并对匹配成功的目标获取深度信息并更新全局结构体，最后显示目标检测结果并进行预警模块的检测与预警信息的发送。另外设计了标志位进行多线程的管理工作，包括线程更新标志位以及退出标志位等。

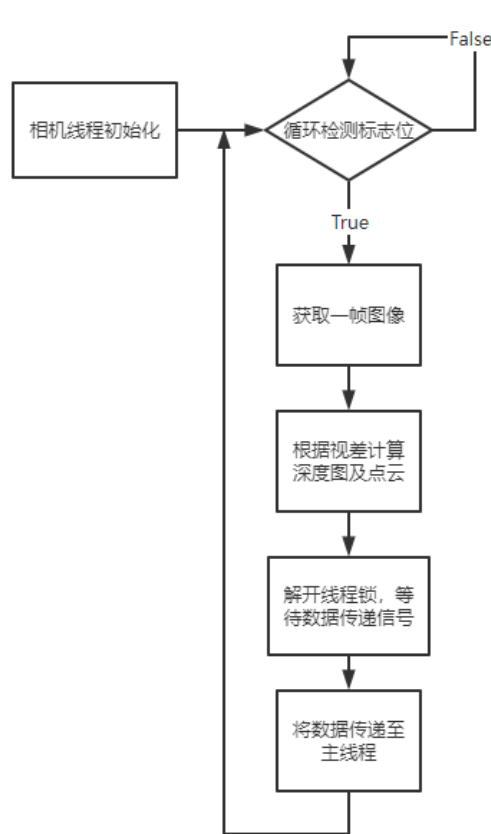


图7.4.2.4 雷达相机线程流程

上图为子线程——相机线程的流程图，主要完成像素获取以及点云图计算等功能。由于Python本身仅支持伪多线程，设计多线程并不能提高代码的运行效率。故在此专门为相机设计多线程的主要原因是ZED相机SDK与Pytorch之间的CUDA核占用问题，将在后面具体说明。

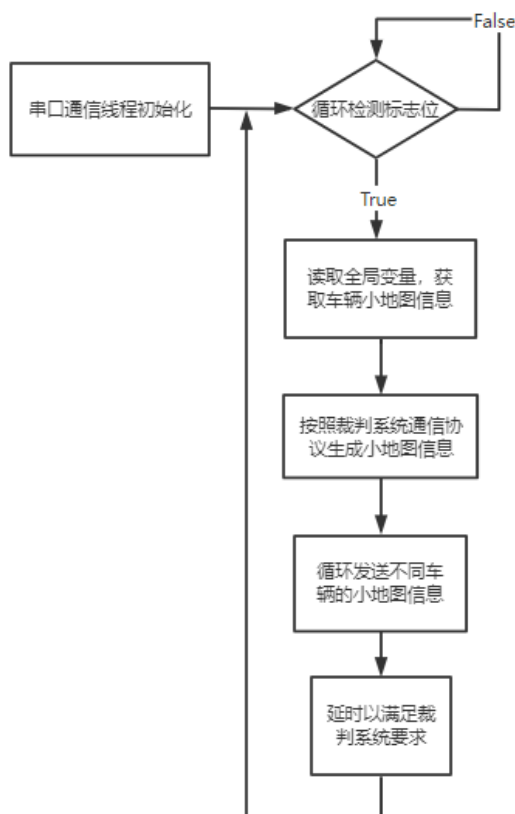


图 7.4.2.5 雷达串口通信线程流程

考虑到裁判系统通信协议中，小地图的上传频率上限为 10Hz。为避免无效的占用带宽，在此设计了异步的等时延形式通信线程，循环读取主线程中实时更新的车辆数据，处理为协议要求的格式后通过 CH340 进行发送，并进行延时以满足裁判系统的要求。

7.4.4.3 重点功能及算法设计

（一）目标检测

通过轻量级的前馈神经网络，回归出像素平面上的车辆以及装甲板坐标。由于选择的显卡算力并不高，受到显存大小以及帧数要求的限制，并不能选择规模更大的识别网络进行更高精度的回归。在多方面因素的权衡下，我们选择的目标检测网络为 Yolov5-l，在测试集上能够满足准确度要求，也能在裁判系统协议的要求下保持相应的帧数。在使用官方 RMCV 数据集的基础上，我们使用了 Mosaic data augment、剪切、Random mask 等基于目标切割的方法和 HSV 色域变换等基于独立色彩通道的方法进行了数据增强，给我们的神经网络模型增添了亮度稳定性以及一定意义上的遮挡稳定性，实现更鲁棒的目标检测。

在此基础上，我们使用通过 ZED 相机拍摄的省赛数据集进行迁移学习，冻结网络前层卷积部分的权重，对靠后的特征提取层使用较小学习率 **finetune**，完成了不同样本域之间的风格转换，使得在受限分辨率以及不理想光照条件下，目标检测模型仍能发挥较好的性能。

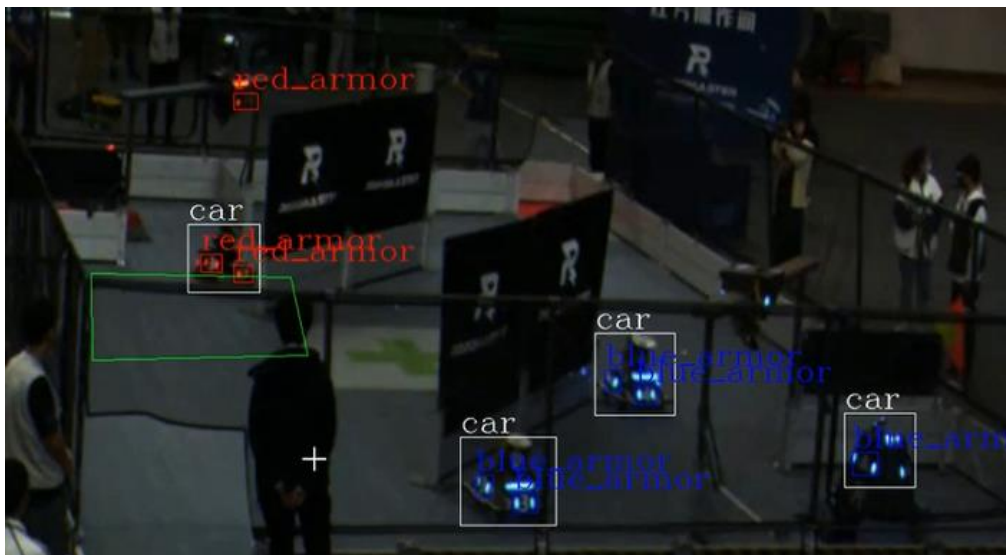


图 7.4.2.6 雷达目标检测结果图

（二）点云计算

由于使用双目相机成像，通过相似关系即可得到相机与像素关键点之间的深度关系。结合相机本身坐标与校正参数，可以进一步计算出相机视角下的点云图。这些工作在相机配套的 SDK 中，通过 GPU 运算完成。在完成点云图计算后，未获得亚像素级的深度信息，我们使用双线性插值法对点云图进行进一步运算，以适配我们选择的高分辨率像素空间。

（三）预警功能

在赛场中由于队员的疏忽，经常发生偷家事件，导致能通过正面对抗取胜的队伍不慎告负。为彻底杜绝此情况的发生，拥有最大视角的雷达需要能够自动识别危险行为，并通过串口通信对危险进行预警。

预警模块主要分为两个部分，包括敌方机器人像素坐标与危险区域包含关系的判定，以及使用卡尔曼滤波预测敌方机器人的走向，识别其行为危险程度，并进行预警。实际中由于云台手的存在与预测功能稳定性的考量，可以自由的开启或关闭该功能。

基于独立时间点的危险预警通过判断敌方机器人是否位于自由划定的危险区域中，来对危险行为进行建模。在此使用了点与凸区域关系的方法，即使用向量点乘来判断点是否处于所划定的凸区域中。由于非凸区域可以由凸区域组合而成，该方法对任何非平滑区域都有非常好的鲁棒性，能够适应任何情况下的区域检测。

而基于卡尔曼滤波的预测功能则是在一阶马尔科夫特性的假设下，利用上一帧中识别到的车辆像素坐标以及当前帧中的车辆坐标来判断其走势，是否有进行偷家行为的风险。

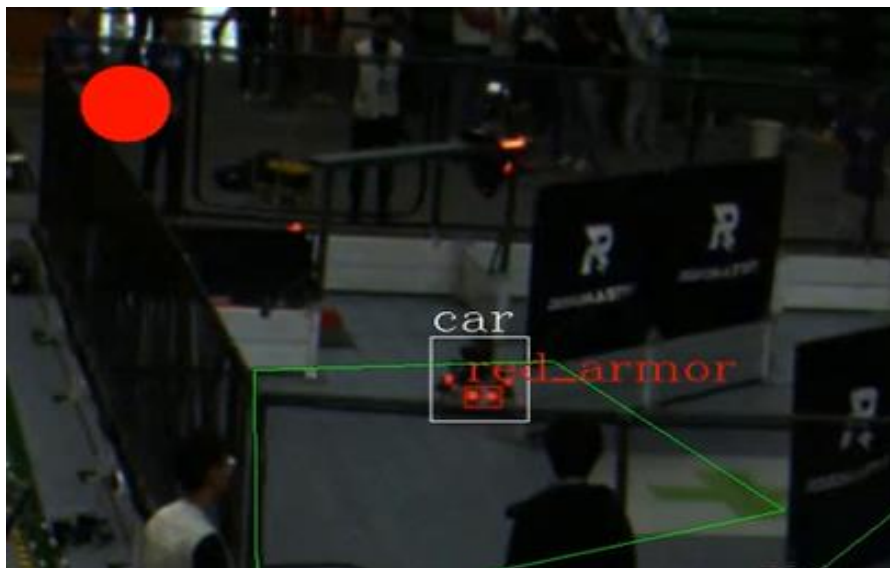


图 7.4.2.7 雷达单帧预警结果图

7.5 研发迭代过程

7.5.1 版本迭代过程记录

表 7.5.1 雷达版本迭代过程记录表

版本号或阶段	功能或性能详细说明	完成时间
V1.0	基于 Yolov4-l、Yolox-s 等模型的目标检测功能测试	2021.10.15
V1.1	确定目标检测方案为 Yolov5-l，完成训练及部署	2021.11.1
V1.2	完成车辆和装甲板类的封装及雷达算法主要流程	2021.12.1
V1.3	改进装甲与车辆的匹配规则，适配各种非理想情况	2021.12.15
V1.4	实装相机模块进行测试，遇到相机与 pytorch 抢占 CUDA 核导致的进程崩溃情况。禁用 pytorch 的 GPU 运算后可正常调用 ZED SDK 进行点云获取。	2021.12.27

7.5.2 重点问题解决记录

表 7.5.2 雷达重点问题解决记录表

序号	问题描述	问题产生原因	问题解决方案&实际解决效果	机器人版本号或阶段	解决人员
1	目标检测不具有尺度不变性，对远处目标及小范围内的多目标无法正确识别	目标检测模型复杂度较低，欠拟合	经过多次对比，选择 YOLOv5-1 作为最终目标检测模型	V1.1	视觉算法高级工程师：布清文
2	目标检测模型对局部被遮挡目标无法正确识别或识别紊乱	训练数据过于理想，泛化能力较差。	通过 Mosaic、随机掩码等数据增强方法提高训练样本复杂度	V1.1	视觉算法高级工程师：徐名韬
3	相机模块无法与 Pytorch 同时使用 GPU 进行运算	ZED SDK 的大规模矩阵运算需要 CUDA 的支持，但其对 CUDA 的占用导致 Pytorch 无法读写 GPU 数据	通过设计 Python 伪多线程解决 GPU 占用问题，使得相机模块得以实装	V2.0	视觉算法高级工程师：徐名韬
4	目标检测模型无法满足帧数要求	GPU 算力限制以及算法流程冗杂等	改进模型内部架构并优化算法流程	V2.1	视觉算法高级工程师：布清文
序号	问题描述	问题产生原因	问题解决方案&实际解决效果	机器人版本号或阶段	解决人员

7.6 团队成员贡献

表 7.6.1 雷达团队成员贡献表

姓名	基本信息 (专业、年级、队内角色)	主要负责工作内容描述	贡献度 (所有成员贡献度合计为 100%)
徐名韬	人工智能与自动化学院人工智能方向、大三、雷达组组长	协调组内成员进度，督促研发任务计划的制定，监督任务完成情况；完成雷达组目标检测、预警功能等功能的设计	60%
布清文	人工智能与自动化学院人工智能方向、大三、雷达组成员	负责雷达组目标检测算法的调试	40%

7.7 参考文献

表 7.7.1 雷达参考文献表

参考文献	收获点分析
《机器学习》- 周志华	学习了基本机器学习理论
https://pjreddie.com/darknet/yolo/	学习了 Yolo 系列的 baseline 和发展
https://pytorch.org/get-started/locally/	学习 Pytorch 的 api 调用
https://pyimagesearch.com/category/object-tracking/	学习目标跟踪系列算法
《神经网络与深度学习》	学习深度学习相关理论基础



邮箱: robomaster@dji.com

论坛: <http://bbs.robomaster.com>

官网: <http://www.robomaster.com>

电话: 0755-36383255 (周一至周五10:30-19:30)

地址: 广东省深圳市南山区西丽镇茶光路1089号集成电路设计应用产业园2楼202