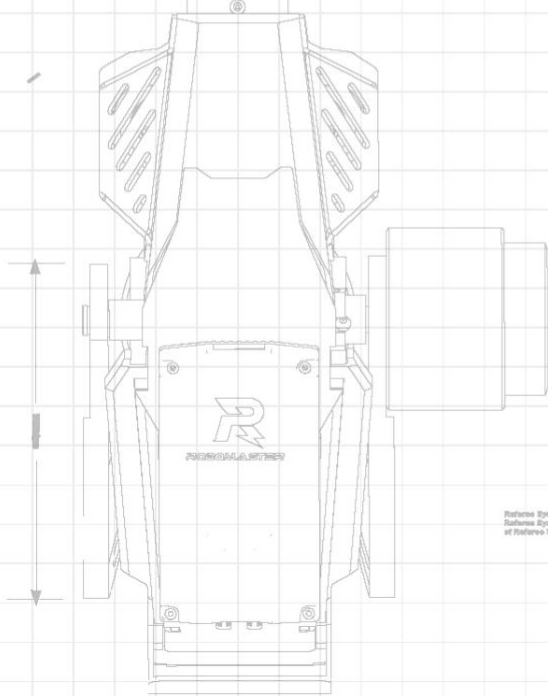


W.PiK

Using a 32-bit motor driver chip and Field-Oriented Control (FOC), the RoboMaster G20 provides DC Motor Speed Control that enables precise control over motor torque.

ROBOMASTER

机甲大师



Especially designed for the RoboMaster G20, the M5500 provides DC Motor Speed and DC Motor Position Control. It includes internal cables and a terminal block.

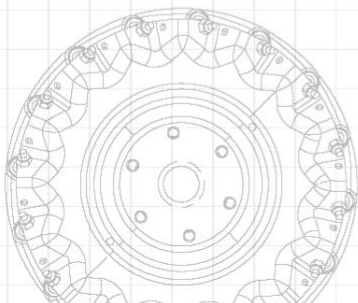
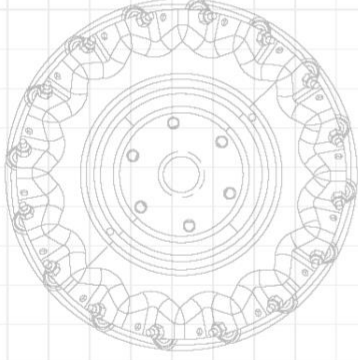
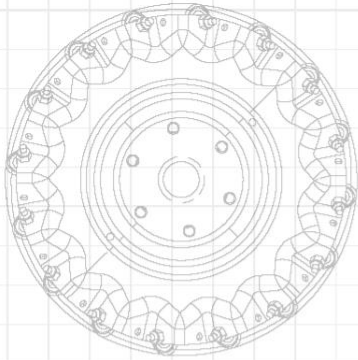
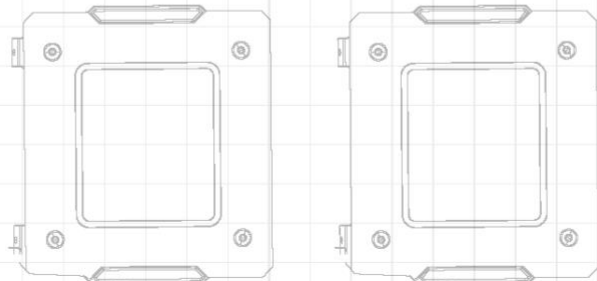
RoboMaster System Specification Manual, RoboMaster User Manual, Introduction of RoboMaster System Kit



The M5500 provides DC Motor Speed and DC Motor Position Control. It includes internal cables and a terminal block.

ROBOMASTER 2022 首都师范大学 超级对抗赛 技术报告

PIE战队编制
2022年8月



目录

1. 其它学校步兵机器人分析综述	1
1.1 浙大-舵轮-双枪	1
1.1.1 结构方案	1
1.1.2 战场战术定位	1
1.1.3 基本参数	2
1.1.4 战场表现	2
1.2 哈工程-平衡步兵-腿轮	3
1.2.1 结构方案	3
1.2.2 战场战术定位	3
1.2.3 基本参数	3
1.2.4 战场表现	4
1.3 华南虎-舵轮	5
1.3.1 结构方案	5
1.3.2 战场战术定位	6
1.3.3 基本参数	6
1.3.4 战场表现	6
1.4 东北大学-平衡步兵	7
1.4.1 机械部分	7
1.4.2 战场战术定位	7
1.4.3 基本参数	7
1.4.4 战场表现	8
2. 机器人功能定义	9
3. 机器人核心参数	12

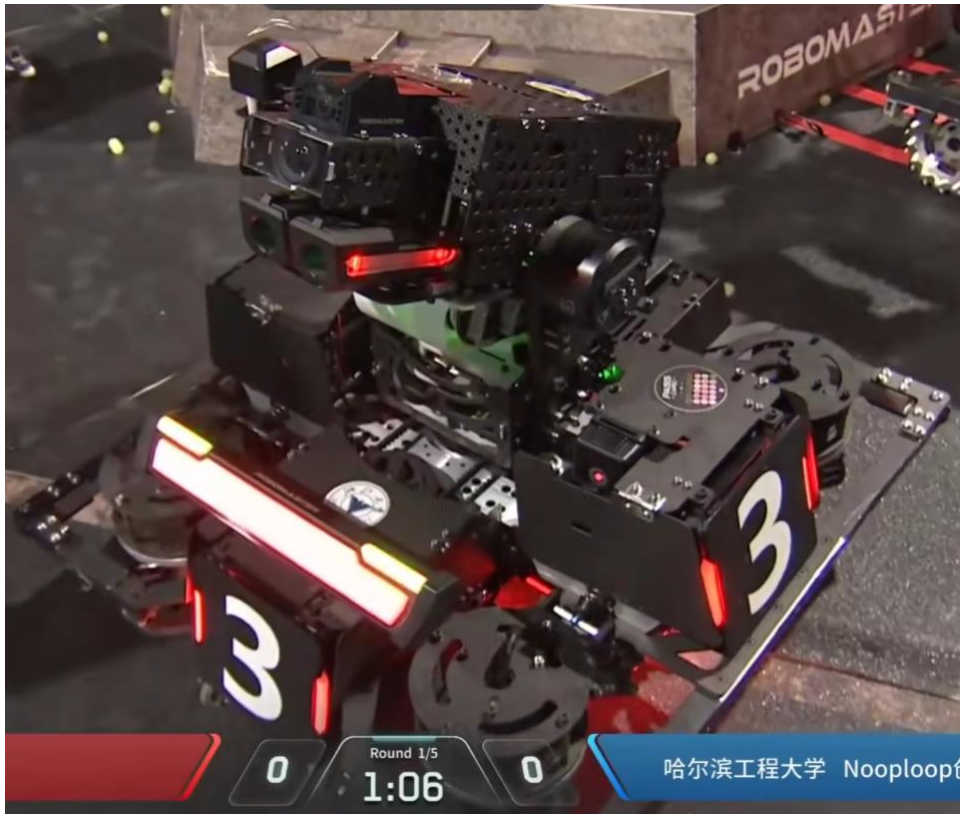
4. 设计方案	15
4.1 机械结构.....	15
4.1.1 结构设计	15
4.1.2 机械基本设计需求分析	19
4.1.3 核心结构及细节设计	20
4.1.4 机械结构总结与展望	35
4.2 硬件设计.....	36
4.2.1 整机硬件框图	36
4.2.2 自研超电	37
4.2.3 关键器件选型	39
4.3 软件设计.....	42
4.3.1 系统架构	42
4.3.2 运行流程	44
4.3.3 重点功能	46
4.3.4 软件测试	48
4.4 算法设计.....	52
4.4.1 整体介绍	52
4.4.2 算法原理及公式推导	54
4.4.3 算法性能	59
4.4.4 算法结果	60
5. 研发迭代过程	63
5.1 版本迭代过程记录.....	63
5.1.1 机械版本迭代	63
5.1.2 电控版本迭代	64
5.1.3 视觉版本迭代	66

5.1.4 电路版本迭代	67
5.2 重点问题解决记录	69
5.2.1 机械部分记录	69
5.2.2 硬件部分记录	70
5.2.3 电控部分记录	71
5.2.4 视觉部分记录	72
6. 团队成员贡献	73
7. 参考文献	74

1. 其它学校步兵机器人分析综述

2022 年开源图纸很少，且由于疫情原因笔主无法到现场参加比赛，只能以比赛视频为依据，挑选了三个赛区的强队的步兵机器人进行分析综述。华南虎战队由于其舵轮步兵与 2021 赛季没有较大改良，因此使用的是 2021 赛季的开源图纸。所有的结构方案都是依靠外观以及队员交流得知，可能会有所误差（华南虎除外）。

1.1 浙大-舵轮-双枪



1.1.1 结构方案

- (1) 底盘：四舵轮结构，配有单独悬挂。装甲板采用交错式，保护壳基本做到整车全面防护
- (2) 发射机构：采用固定式双枪结构

1.1.2 战场战术定位

舵轮步兵机器人通过利用自身的机动性，扮演一个突进和防守兼并的角色，血量底盘，一级的时候具有飞坡功能，需要相同功率情况下，小陀螺转的更快，运动灵活，能够快速突进。

使他在一级能够依靠双枪带来的热量优势突进地方后排进行猛烈的输出，较高的掩护能力，保证己方英雄机器人的输出。

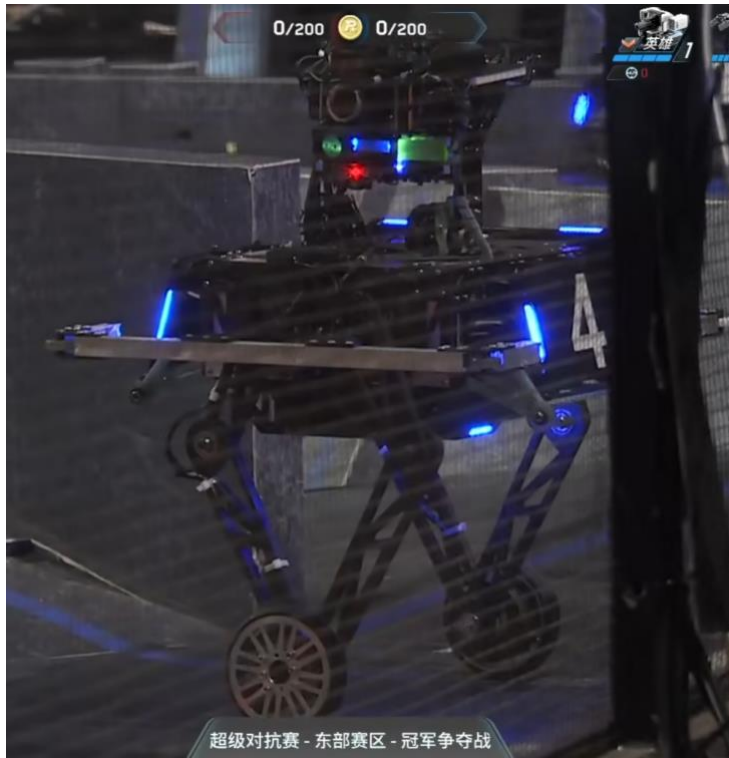
1.1.3 基本参数

重量：未知，体积：未知。

1.1.4 战场表现

浙大的舵轮步兵，在实战上与战术定位有点差距，但影响不大，对后排的绕后输出在决赛上表现的还是很亮眼的。

1.2 哈工程-平衡步兵-腿轮



1.2.1 结构方案

(1) 底盘

采用腿轮式方案，可随意抬升车体，具有极强的自适应能力以及脱困能力。图中为站立击打对方高地的步兵机器人，将其腿轮式方案的优势展现的淋漓尽致。

(2) 云台

Pitch 轴电机放在云台内部，使用四杆结构控制云台俯仰

1.2.2 战场战术定位

利用侧面没有装甲板的优势，在固定击打时可以做到无伤压制，借此在全局充当输出压制的角色。在前期依靠可升降底盘压制敌方高台步兵，干扰其打符，确保己方获得攻击加成。

1.2.3 基本参数

重量：未知，体积：未知。

1.2.4 战场表现

在东部赛区决赛中，平衡步兵表现十分惊艳。不论是前期在对方前哨战前压制高地上的步兵，使其数次血量堪忧回家补状态，帮助己方队友拿到攻击加成，还是在中期解决掉了敌方想要绕后的双枪步兵，我们可以看到这是一辆攻守兼备的平衡步兵。

1.3 华南虎-舵轮



1.3.1 结构方案

(1) 发射机构

- ①射速：极差 1.0 以内，射速可控；
- ②射频&最高射频：1 秒 15 发、单发可控无误射；
- ③稳定性：1000 发以内弹丸射速均值掉速不超过 1.0；

(2) 底盘

保护舵轮车与步兵车、英雄车、工程车相向全速对撞、小陀螺对撞以及与水泥墙面全速冲撞后车辆无损坏。

100w 时平移最大速度可以达到 3m/s 以上，小陀螺速度可以达到 6rad/s 以上，上坡时间可以稳定在 3s 以内，可以小陀螺上坡能实现全向移动，响应更快，自旋和平移的能量利用率更高，控制更加灵活。

但舵轮底盘本身有个致命缺点：无特殊装置时，舵轮底盘断电后不能像麦轮底盘一样随意拖动，工程机器人难以对其进行拖拽到基地进行复活。所以设计底盘的救援机构，加了个舵机便于救援。可救援机构增重较多。增加救援机构后，单个轮组相较于原来的轮组增重将近 1kg。加上工况恶劣，舵机容易烧坏。维修性差。所以悬挂决定采用最简单的独立悬挂形式，

单摇臂独立悬挂，为了避免单摇臂独立悬挂在受力时出现 roll 轴上的偏转，两块转动板之间进行了固连。

1.3.2 战场战术定位

舵轮底盘具有机动性强、弹丸躲避率高的优势，是地面对战强势单位。通过击杀当下最首要的敌方目标，舵轮步兵能控制比赛节奏，比如击杀敌方英雄、干扰敌方打符等，并保护英雄推倒敌方基地。

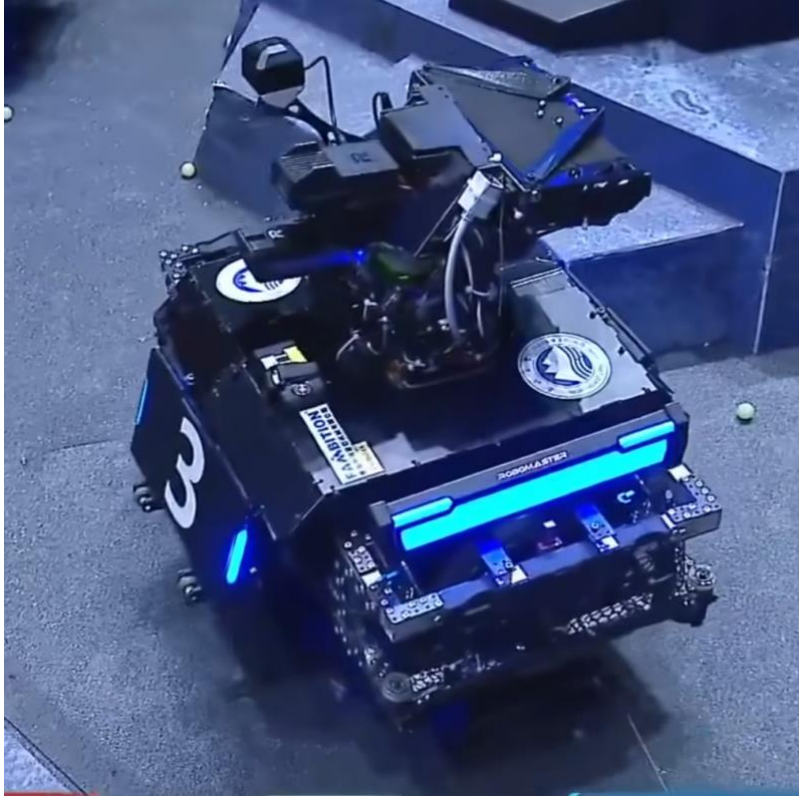
1.3.3 基本参数

重量：24.7kg，体积：595mm x 595mm x 495mm。

1.3.4 战场表现

华南理工的舵轮步兵就将自身的战术目标完成的很好，不论是击杀还是干扰都在战场上令敌人头疼，接近圆形的外壳也让它几次脱离危险。

1.4 东北大学-平衡步兵



1.4.1 机械部分

底盘：东大的平衡步兵轮组并没有采用腿轮式设计，而是独立悬挂系统，相较于腿轮，该方案在脱困能力、自适应能力上比较劣势，但是在代码的复杂程度、经济上优势还是比较明显的。

1.4.2 战场战术定位

利用侧面没有装甲板的优势，在固定击打时可以做到无伤压制，借此在全局充当输出压制的角色。在前期依靠高机动性在中场保护工程取矿并借机骚扰前哨战附近的步兵。中期在工程取完矿的情况下在其身后进行中场压制输出。

1.4.3 基本参数

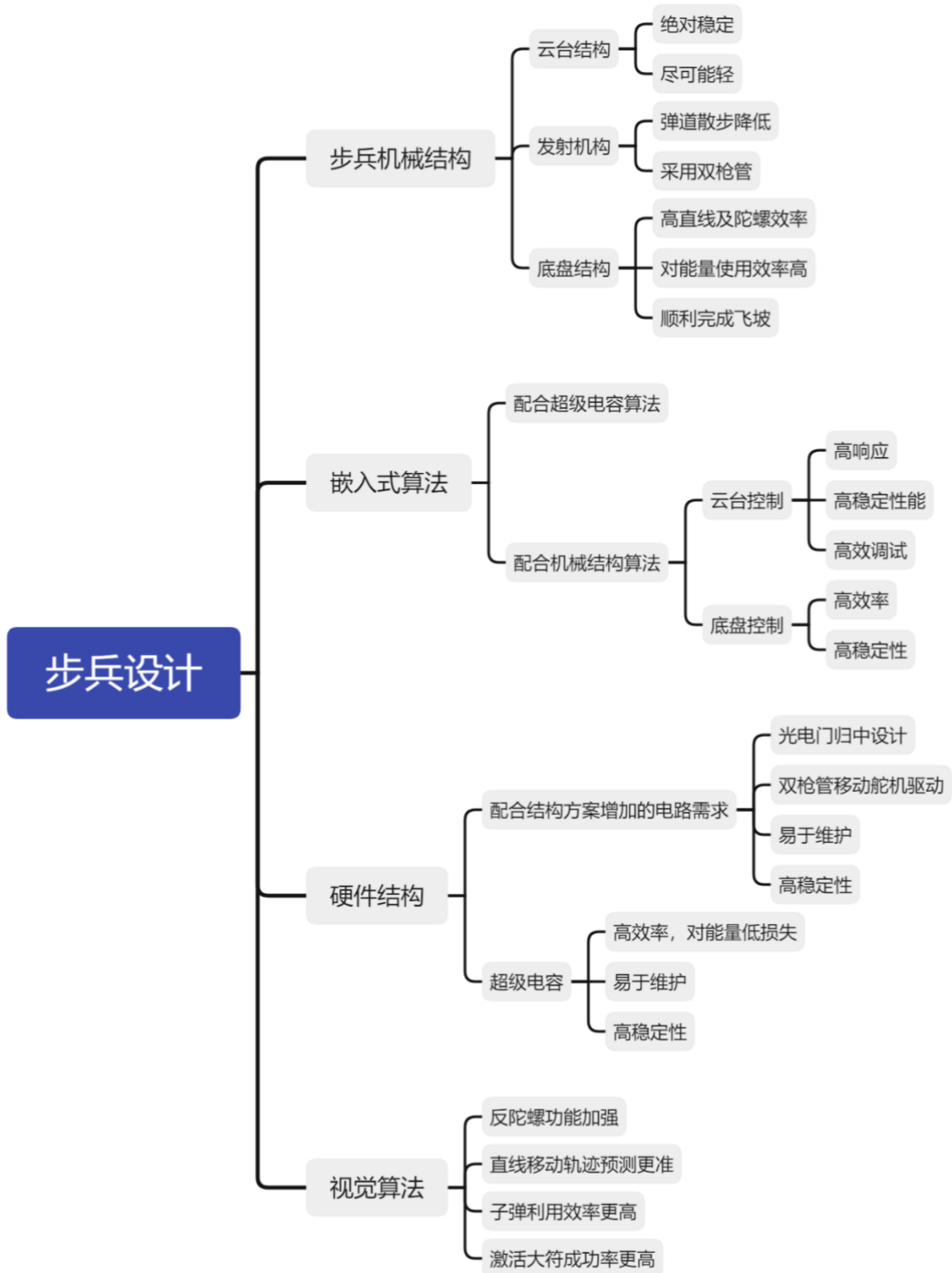
重量：未知，体积：未知。

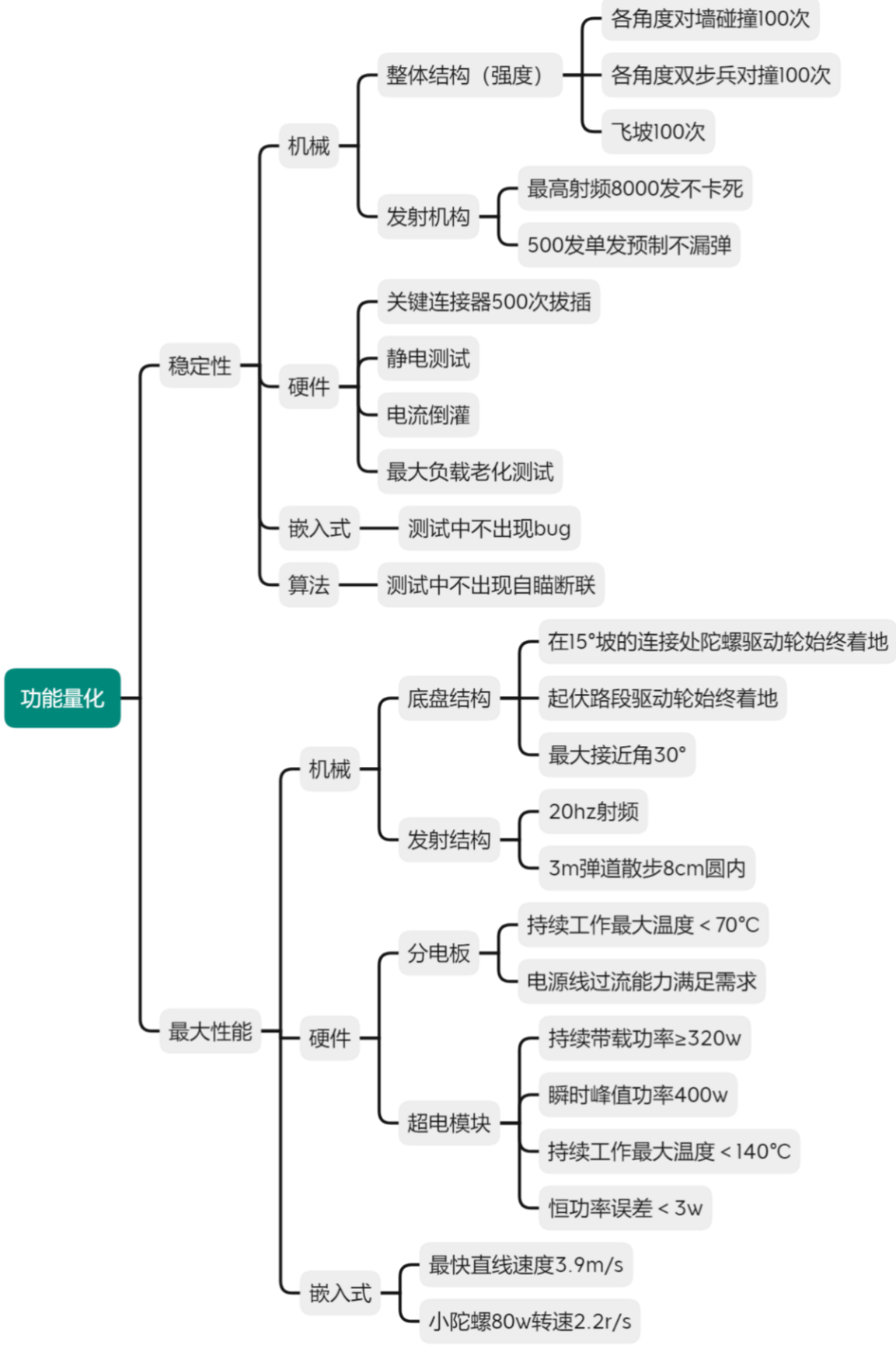
1.4.4 战场表现

在南部赛区决赛中依靠双平衡步兵的优势，甚至在中期团灭的对手。可以说完美的发挥了其战术定位的一切设想。

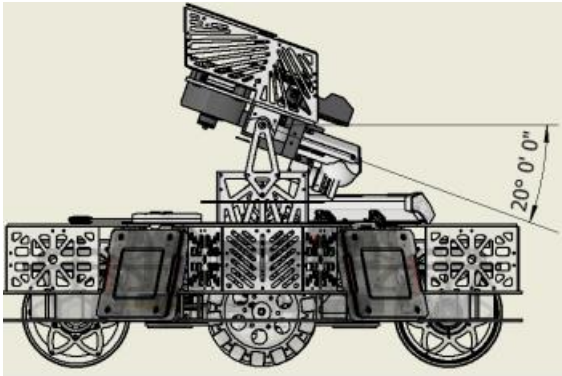
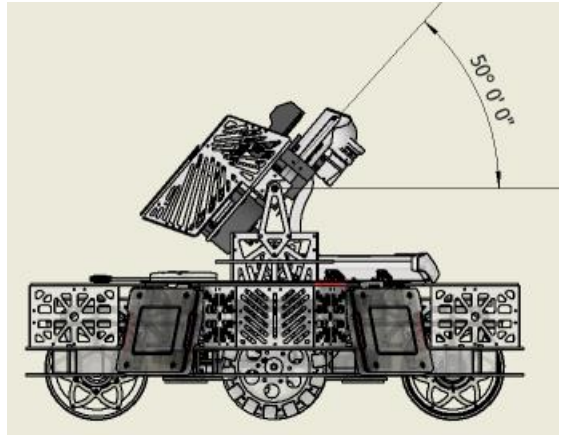
2. 机器人功能定义

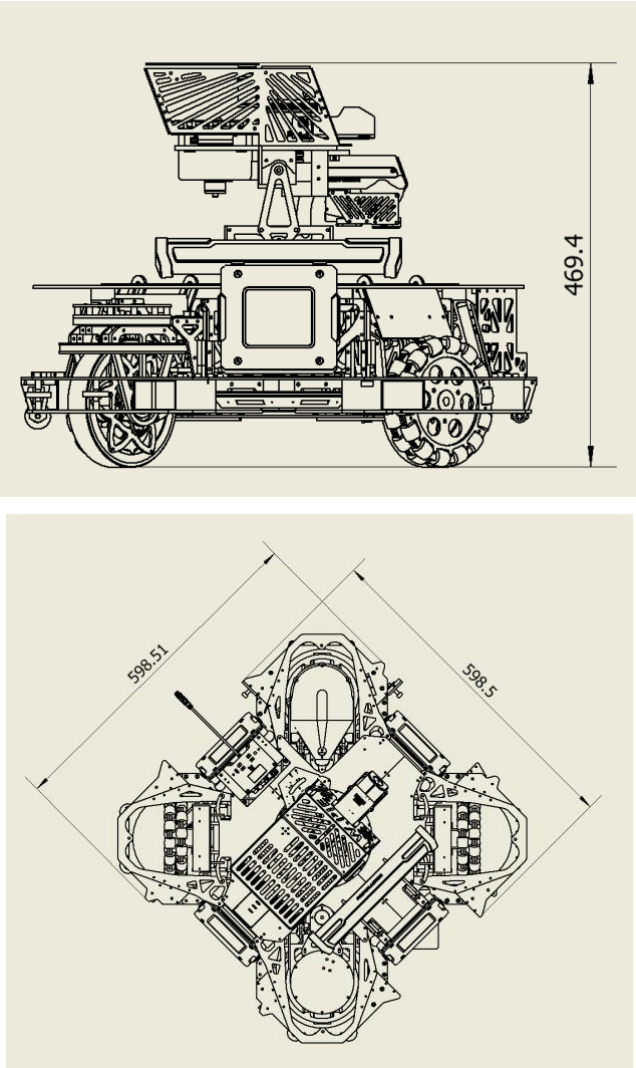
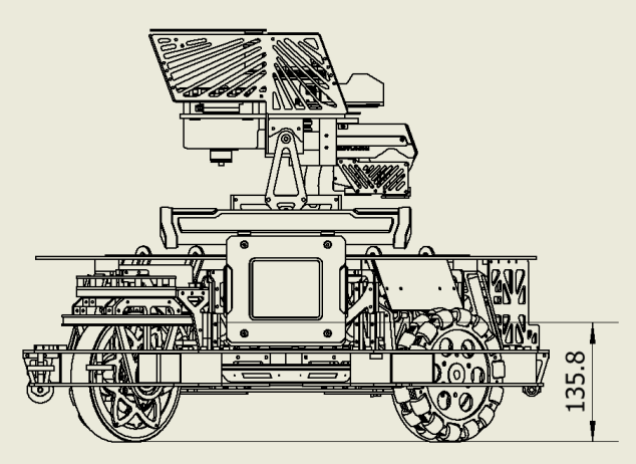
对于步兵的战场定位和功能需求，我对步兵的定义是一个高性能，高机动性的兵种。一个比较好的战术定位词是“游击战”大兵。在对去年的比赛观察中发现，在双方前哨站均被打掉后，在对哨兵进行击打时，存在一种跑打战术。即先飞坡、或者高速移动到对方的哨兵轨道前进行击打和骚扰，如果对对方哨兵造成血量减少或者发现出现兵力劣势后再高速移动回己方优势区域，同时在跑动过程中进行连续发射弹丸，火力持续性较久。为了实行这种战术，对步兵的机械结构，超电硬件性能，控制算法，自瞄稳定性上都提出了要求。机械结构上对底盘性能和发射机构的发射持续性进行了要求，为满足机械结构的方案定义，底盘选用了双舵轮方案，云台采用了双枪口转换的方案。电路上需求除超电功能外加入对舵向控制的相关其他电路，嵌入式代码上需要加入舵轮高效功率控制相关的内容，并使得自瞄系统更加稳定，使得步兵能达到功能定义。

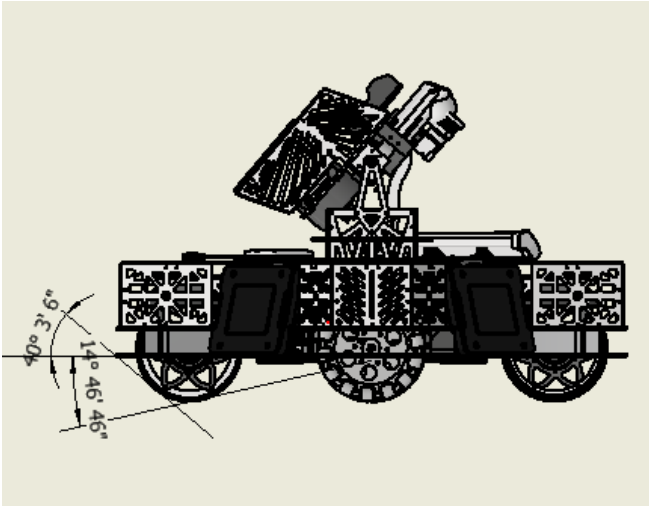




3. 机器人核心参数

参数类型	实际数据	图示/备注
机械结构		
质量	18kg	包含裁判系统重量
云台自由度	360°	
俯仰角	俯角 20° 仰角 50°	 

<p>长*宽*高</p>	<p>598.51mm*598.51mm*469.4mm</p>	
<p>重心高度</p>	<p>135.8mm</p>	

接近/通过角	40° 15°	
--------	------------	------------------------------------------------------------------------------------

参数类型	实际数据
超级电容	
整板运行功耗	2w
超级电容使用电压范围	8V~21V
恒功率误差（实际功率与目标功率的误差）	3w左右
充电最大过流能力	10A
超级电容输出功率	可达 320 w
整板工作时最高温度	140℃
整个充电模块最大体积	7.5cm * 4.5cm * 7cm
升压模块输出电压	25V
DAC 输出误差	0.01V
ADC 读取误差	0.01V

4. 设计方案

4.1 机械结构

4.1.1 结构设计

4.1.1.1 底盘结构

底盘结构在 RoboMaster 比赛从 15 年开始以来步兵底盘结构随着战场环境不断变化，队伍对机器人得底盘得需求也不断细致化，细节化。

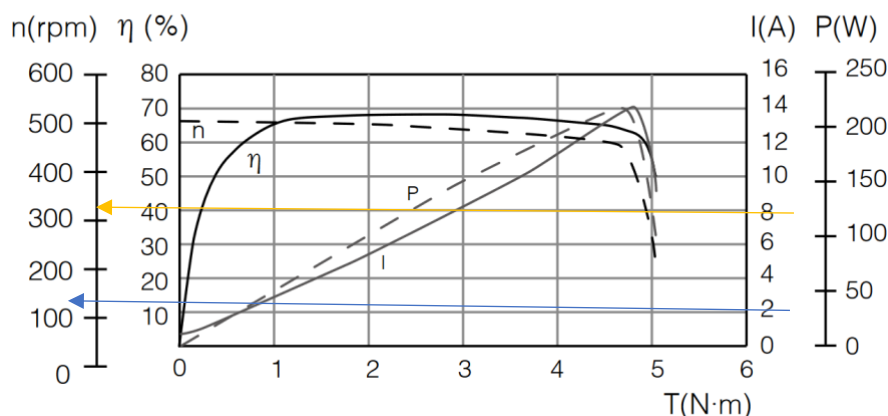
在 2015 年 RM 初步创立得时代，为了让机器人更加灵活，让机器人拥有高机动性麦克纳姆轮出现在了 RM 得战场上，而同样可以使得机器人进行全向移动得全向轮，由于若需要满足圆周自转得需求只能进行 O 型排列，使得机器人框架布局相对困难，较难在有限的正方形内使得空间利用效率最大化。在早年比赛的机器人设计中，由于布局的困难性全向轮底盘逐渐退出了历史的舞台。随着 2017 年中国矿业大学的异军突起，其设计的“小陀螺”云台和底盘能实现相对旋转的机构和形式，逐渐成为战场上的主流。逐渐在战场上，机器人的状态不再限制于扭腰等基础操作，逐渐扩展到平移和旋转的复合运动中。2018 年后战场三位化，复杂化，底面状态逐渐崎岖不平，同时机器人底盘移动要求更加灵活，这就对参赛队伍的底盘性能提出了更高的要求，对于崎岖不平以及斜坡的地面，若同样需要机器人进行全向移动，实现灵活的机动性能，则要求机器人的底盘在通过崎岖不平的地面时也能做到四个轮子全部垂直接触地面，才能完成四个轮子提供速度分量的合成，为了满足接地性能的需求，上海交通大学在 2019 年使用了“自适应底盘技术”，释放一个底盘的自由度，使得四个轮子和地面本身加在一起能满足全自由度的需求。在去年，随着陀螺速度的需求上升，哈工深的全向轮步兵进入大家的视野，其高效的陀螺周向速度给大家耳目一新感。同时以哈工大，华南虎为代表的舵轮系统，其高速的直线行进速度和陀螺周向速度也是赛场绝对的霸主。

随着今年规则对舵轮的舵向功率做出限制。为保证总功率，舵轮在变相时的灵活性有所下降。对于今年步兵的战术定位，步兵的跑打能力优先级很高，所以对直线前进的速度要求优先级很高，所以在方案选型上选择了直线速度有优势的舵轮系统，但是为了更加深入的解决舵轮的功率和效率的问题，进行了以下方案的分析对舵轮效率进行提升：

在总效率上，输入功率一定时，底盘能使用的不限制功率的能量最大为 2000j，因此 2000j

能量的能速比就要求提高，在观察去年麦轮步兵的数据发现，无论在何种时候在赛场上，底盘的总功率总是不会超过 300w，因此单个麦轮驱动轮总功率不会超过 75w 对应舵轮的驱动轮来说单个轮子的能速比会更高，同时在底盘总功率相同时，减少驱动轮数量能有效提升电机效率，这里放出 3508 的功率-效率曲线，可发现在功率 75w 时效率远低于 150w。

负载特性曲线（使用 RoboMaster C620 电调做电流闭环控制）



图中 75w 对应的为大约为 25%的效率，150w 对应的约 50%的效率。

因此在底盘极限总功率不超过 300w 时（也受到超电硬件限制），驱动轮数量越少，效率越高（经过了科学的分析得出了一个反直觉的结论）。同时另一个问题也出现了，由于驱动轮数量减少，为达到四个轮子的总加速度，单个轮子在加速时所需要的加速度也有所增加，（解决以上问题下面工艺使用时进行分析）单个驱动轮的加速度增加导致轮子对电机的扭矩需求增加，为了减少加速度增加带来的扭矩压力，可以通过减少驱动轮直径来弥补。对单个轮胎的静摩擦系数也有更高的要求去适应更高的加速度。同时更少的驱动轮也要保证驱动轮全部接地才有更好的加速性能。为了达到最高效率，在对对地静摩擦力分析（选用两种轮不同的工艺）一种为聚氨酯包胶喷砂工艺，另一种选用模压成型的光面橡胶包胶，经过对比，橡胶包胶的对官方地胶的静摩擦系数大于聚氨酯包胶喷砂，并经过多次包胶实验发现，同等下压力情况下，光面包胶的最大静默力远大于喷砂处理后的聚氨酯表面，但是相应的光面包胶容易沾灰，需要高频率维护和清理。

一方面从降低车身重量出发，另一方面从机械结构方案上出发，以提高系统的工作效率，在舵轮数量的选择上，舵轮最少能满足全向解算为两个轮，三舵轮也可以完成，在机械结构上，双舵轮需要额外的支撑轮来对底盘结构进行支撑，并且需要满足结构的接地性能要求。

但是使用电机也相应少，效率也高。三舵轮在接地性能上有先天的优势，无论什么条件下，都能做到完美的三个驱动轮能完美接地，但是问题在于三舵轮的结构布局在现有的裁判系统以及装甲板下难以进行布局，为了保证在裁判系统的设计范围内，三个轮的摆放位置会相当奇怪，同时三个轮的翻车风险也相对较大。对于三个驱动轮的翻车可能性分析（这里位置不够了单独拉出来分析）因此最后选择相对好布局的对角双舵轮作为底盘的大结构，同时为了提高底盘的接地性能，在悬挂结构上选择了自适应底盘结构。

4.1.1.2 云台结构

从 2015 年开始官方推出摩擦轮机构以来，发射机构现在最大比例是使用双摩擦轮作为发射机构。在供弹方式上，出现了上供弹，半上供弹，下供弹三种形式。三种形式的机械结构的复杂度上是下供弹大于半上供弹然后大于上供弹。随着硬管链路的普及，发射延时已经不是发射系统主要关心的目标。但是由于陀螺功能的需求，滑环开始成为机械结构着重考虑的一个标准件，因为滑环性能的限制，机械结构在布局云台的时候只能将电脑布局在云台上，这样使得三种云台在布局的时候云台上的必要元素差异只有弹舱，在弹舱载弹量上，下供弹存在优势，但是云台惯量上，由于相对而言只有弹舱在底盘上，惯量优势相对减少；并且由于机械结构的复杂度增加，弹链卡弹几率相对较高，重量相对也增加，可靠性相对降低，同时这样的纯下供弹的方式是无法进行双枪双发射机构的形式。在存储弹丸数量上的优势，对于跑打战术的机器人来说，可以做到单次跑动回时到补弹区进行补弹，对单次存弹的优势感知并不大，但是机器人整体重量却可以轻许多，获得一定的重量优势，以进行速度提高。并且拥有很高的稳定性。因此在跑打战术的机器人云台结构选型中我们选择了上供弹的形式。

4.1.1.3 发射机构

发射机构由于对枪口热量持续性的需求，我们选择了双测速机构的形式，双枪步兵去年出现在战场上的形式存在三种，

第一类是类似东大的双发射机构双拨盘，结构优点特性在于双发射机构双拨盘可控性高，可以根据战术调节热量的分配方式，是突然爆发双枪管同时发射还是细水长流一管热量打完去打另一管，战术调节机动性高。但是相对结构相对复杂，且双摩擦轮双拨弹结构只能位于 yaw 以上造成云台惯量过大，云台响应差等缺点。浙江大学将四个摩擦轮合并为两个，减少 pitch 重力矩同时也带来了共摩擦轮子弹同时发射弹速不稳定的问题。北京工业大学将结构设

计为一路链路下供弹另一路链路半上供弹，可以解决部分弹舱惯量过大问题，但是整体结构变得复杂化，相对可靠性差的同时云台惯量相对于双 pitch 上拨盘也不明显。

第二类是只能同时发射两路弹丸的结构，这类结构以华南虎的双枪结构专利为典型，两个发射机构公用一个拨盘，要发射需要两个枪口同时进行拨弹进行发射。这类结构的特点是具有强爆发性能，在牺牲远距离发射的情况下（一般为双枪管左右并列但在同一云台上，远距离目标弹道分叉较大）保证近距离火力的猛烈，比较适合用于哨兵这类热量限制较大的兵种上。对于跑打战术来说，会更偏向于使用连续的长热量输出来保证火力的连续性的游击战。

第三类双枪结构是同时只有一路发射机构可以发射，这种形式最符合游击战类步兵。这类双枪结构还可以分为西交利物浦类双拨盘三摩擦轮类，深大的单拨盘正反拨类，还有福建工程学院的一套发射机构两个枪口方案。综合成本以及云台 pitch 的重力矩考虑，最后选择了福建工程学院这类的一套发射机构两个测速模块的双枪结构，来保证热量的连续性。

4.1.2 机械基本设计需求分析

对于结构的需求，设计者将步兵舵轮底盘的设计分成三种需求层次，对于不同的需求层次，对应着设计者在设计过程中的思考级别和思维方式，最基础的是机械设计的需求层次，然后是功能需求的层次，最后是外观，电气走线等其他需求。

其中：机械设计包含的需求是贯穿设计始终的原则性需求，包含：结构设计的强度需求，刚度需求，稳定型需求；重量和体积的需求，体积和接口约束，加工工艺限制，以及装配和维护的需求。

对于强度和刚度的需求是在有限的成本和材料内，希望设计出的结构能满足在战场恶劣工况下，结构不失效，形变范围在可接受范围。同时对战场恶劣工况进行量化。在静载和动载下对受力，冲量，等工况条件进行量化，以使得能起到使用仿真对结构进行强度和刚度的可靠性测试的需求。

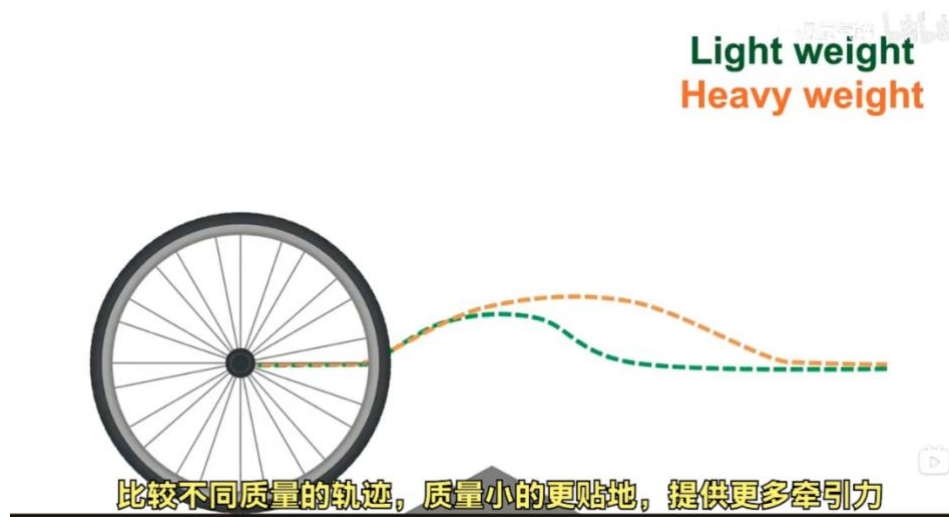
合适的体积和空间高的使用率是作为机械设计者永恒追求目标。在满足尽可能高的空间使用率的前提下应该提前确定空间上的相关接口和约束。在空间约束还应该注意云台俯角对底盘的高度约束，尽可能降低底盘结构最高高度，同时为了防止地面大弹丸卡到底盘最低点与地面之间应有大于 45mm 的底盘空间。云台为完成陀螺，需要预留中间陀螺旋转的空间，云台设计者给出了中间按的尺寸约束，底盘中间高度不得高度离地 100mm，留出圆柱形空间圆柱直径 250mm。同时结合官方对步兵的体积约束，底盘最大尺寸不得超过地面 600x600 的空间。重量上，应该在满足强度和刚度的前提下，用有限的成本设计出最低重量的结构，以提高在有限能量下的移动效率。

加工工艺方面，选用的是现有加工条件下可以自主进行加工的材料和工艺，尽可能少量的使用外包零件，同时采用市面上现有成品零件进行改造和改良，以降低整体的制造成本，2.5d 铝件 cnc 铣雕，板材雕刻，铝管 cnc 雕刻，少量低成本外包钣金。应注意不同加工工艺对应的材料力学特性进行结构布局，保证整体结构刚度。同时应注意不同加工工艺对应的公差大小合理进行设计。

4.1.3 核心结构及细节设计

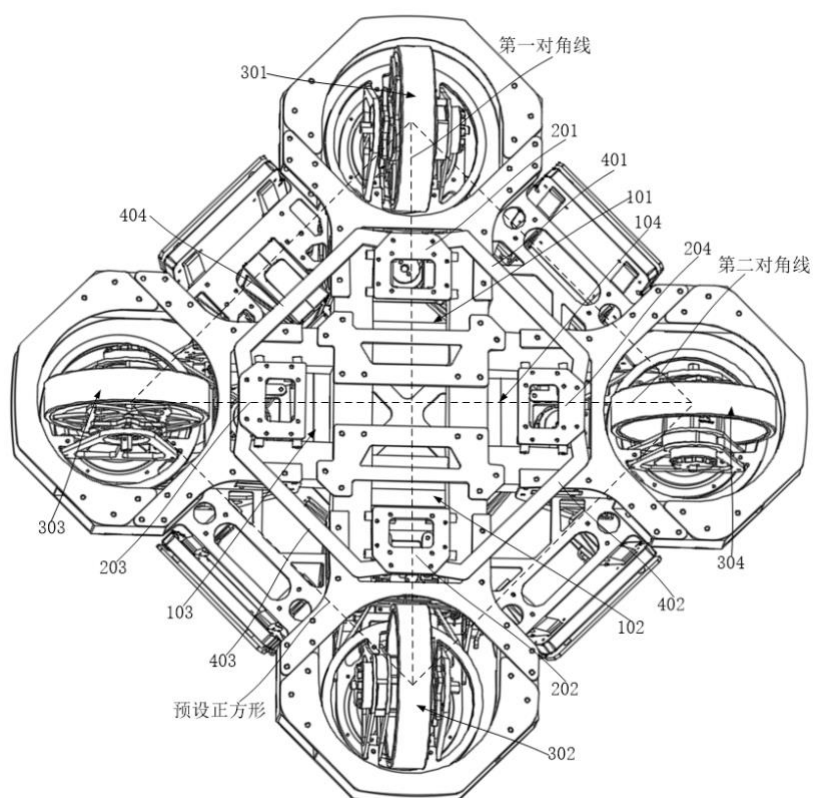
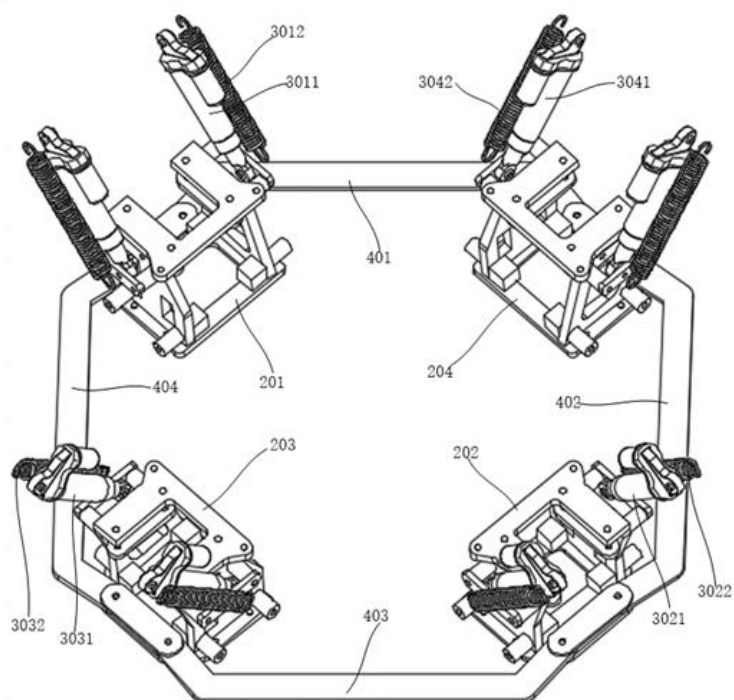
4.1.3.1 底盘结构

对于 RoboMaster 战场的机器人来说，悬挂设计所需要遵循的需求有两类，第一类是面对突发冲击载荷时，减小底盘刚性系统受到的力，比如飞坡，下台阶等。本质是延长悬挂受到压缩的时间以减少在对同样的冲量时所对应的力的作用时间，第二类需求是在通过起伏路段时有一定隔震性能，减少在通过起伏路段时云台系统的起伏程度，达到稳定云台的效果。对于这两类需求，对应着悬挂避震部分弹簧的 k 值大小和悬挂的簧下质量不同。对于飞坡等需求，需要一个相对较大的弹簧 k 值（在 30mm 抱着车摔下前悬挂着地可以正好压缩完整个悬挂的整个行程就是较为合适飞坡的 k 值）对于簧下质量没有特别的需求。对于飞坡需求较高的高机动性能得步兵机器人来说，低得弹簧 k 值会让悬挂在触地时悬挂行程提前压缩，刚性结构需要承受更大得负载。对于第二类需求，通过起伏路段时，相对较低得弹簧 k 值会让车身更加平稳，云台接受更少震动。同时较低的簧下质量会让驱动轮更早着地使得独立悬挂的轮组有更好的接地性能（结论来源 <https://www.youtube.com/c/andrexttr/feature>）



尤其对于接地性能，簧下质量需要相对较小。对于这类低 k 值的弹簧，比较容易出现在启动和急停时的点头和摇头情况，严重影响操作手操作和视觉算法解算云台位置。对于独立悬挂，需要两者都有的兼顾的良好性能，有些参赛队选择直接将两类悬挂串联在一起或者使用不均匀变刚度 k 值弹簧，以获得更高的接地性能和更强的耐冲击性能。但是这样的作法还是避免不了一级弹簧或者变刚度弹簧出现的点头问题。

对于独立悬挂的接地性能问题，传统的独立悬挂所不到多轮接地性能和较小的点头角共存。为了解决以上问题，自适应悬挂出现了。在 2020 年的上海交通大学的开源中我们可以看到，其实现的核心在于中央连接左右两组麦克纳姆轮的平行四边形，实现对角侧的轮组同时上升，相邻的轮组反向运动，并在底盘四个轮组中空出一个自由度，使得底盘和地面在一起的悬挂总自由度为 0。但是由于选择使用中心对称的舵轮结构，因此较难实现和上交一样的云台布局 and 底盘构型形式，中间没有空间留给自适应连杆。同时上交设计的自适应系统也存在推杆悬挂系统中存在需要高精度加工的连杆避震器。2020 年哈公深的悬挂方案能满足中心对称的底盘结构定义，但是由于避震器的长度受到标准件的限制，底盘中避震器的位置一定会放在较为靠近底盘中央的区域，严重影响了云台布局与裁判系统的放置。同时其自适应结构不能单侧轮组突然受到冲击，这样的冲击不能使得压簧压缩，避震性能和落地姿态有关，存在一定的避震局限性。为了避免结构干涉，不适用结构中的高精度加工钢避震器减少成本，同时也有较为灵活的底盘裁判系统布局空间。笔者设计了一种新型的自适应底盘结构，在保证自适应功能的同时，结构中心对称，同时又有低成本，低质量，悬挂布局灵活，底盘相对高度较低等特点，并对底盘的落地姿态并无要求，自适应结构轮组运动行程与与独立避震运动行程可调节，并使用多种工艺与材料特性结合解决了以上困难的同时也保证了底盘系统的低重量高刚性。基本原理如下（在悬挂结构设计初期，选用了四舵轮结构，后改为双舵轮底盘形式，底盘自适应机构原理不变）



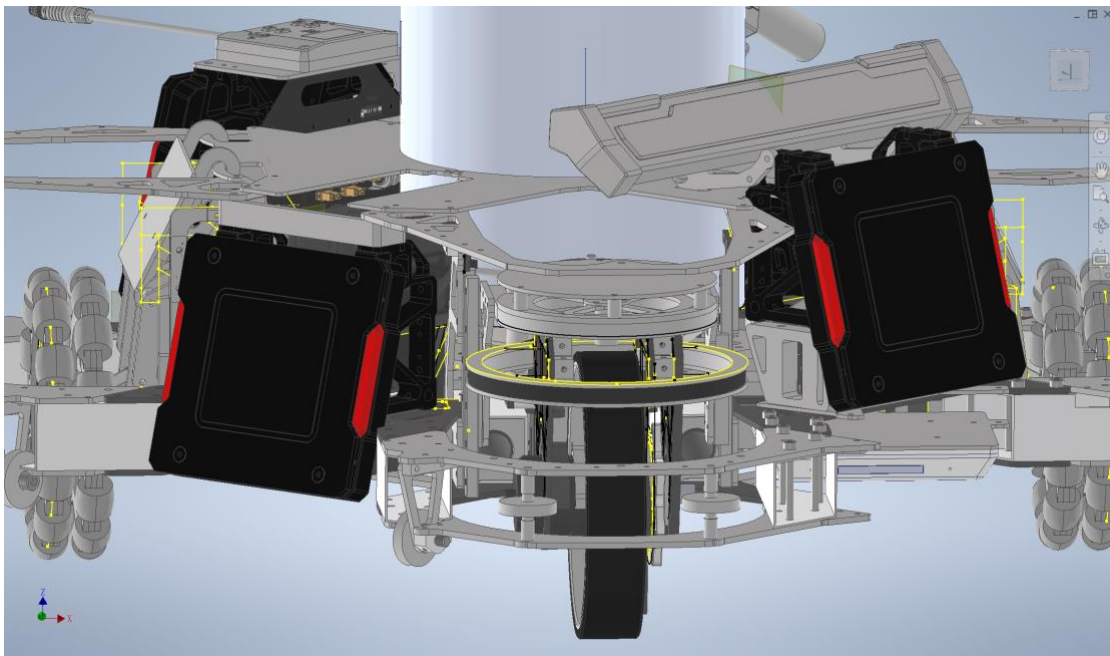
其图为专利申请原理图的一部分，其本质是利用了等边菱形四顶点被约束在固定轨道上时，对角顶点运动方相反，邻角运动方向相同的性质。并利用直线悬挂+拉簧推杆组合的式，实现满足结构约束的同时，能实现自适应结构和独立悬挂的特性，并相应的减少了底盘高度，

增加了云台俯角。遇到崎岖的路面时，八连杆机构可以使第一滑块与第二滑块的滑动方向相反，三滑块与第四滑块的滑动方向相反；即第一车轮组件和第二车轮组件的移动方向相反，第三车轮组件和第四车轮组件的移动方向相反；进而使各车轮组件可以时刻与地面接触，以提高底盘装置的通过性。

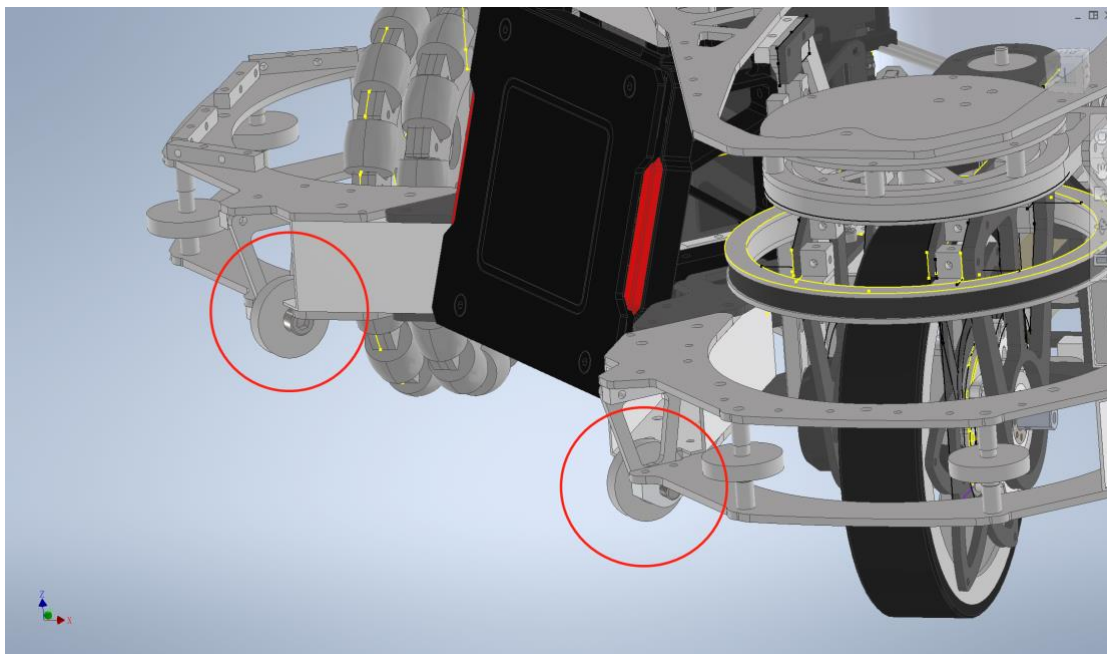
舵轮底盘优化升级方案：

上一代研发的自适应底盘，通过起伏路段时十分平顺，在操控手视角里控制界面的抖动控制的不错，减少了操作手的晕眩感并且极大的提升了发射机构的精准度。在上下坡时，自适应地盘也很好的发挥了功效，该结构使四轮完美贴合地面，增大接地面积的同时也减少了地盘功率，增加其他结构的电机的输出能力。在新的一代里我们为了增加生存能力、飞坡能力、地盘关键模块的保护，增加了交错装甲板、飞坡导轮以及异形保护罩。

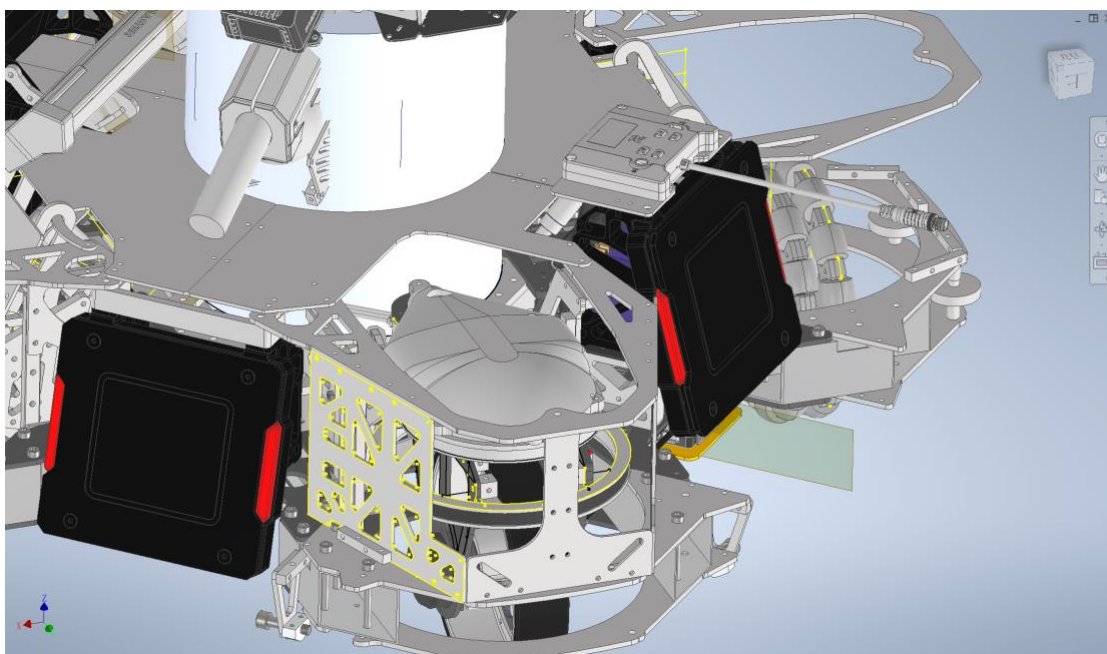
生存能力：当步兵受到攻击时，小陀螺开启，敌人只要瞄准好一个装甲板的位置并发射弹丸，那相当于也瞄准了其他三个装甲板，这样在小陀螺的过程中，掉血的几率直线上升。如果我们改变其中两个装甲板的高度，使其四个装甲板不在同一水平面上，受到击打时就有一定概率躲避掉弹丸，从而减少掉血提高生存能力。



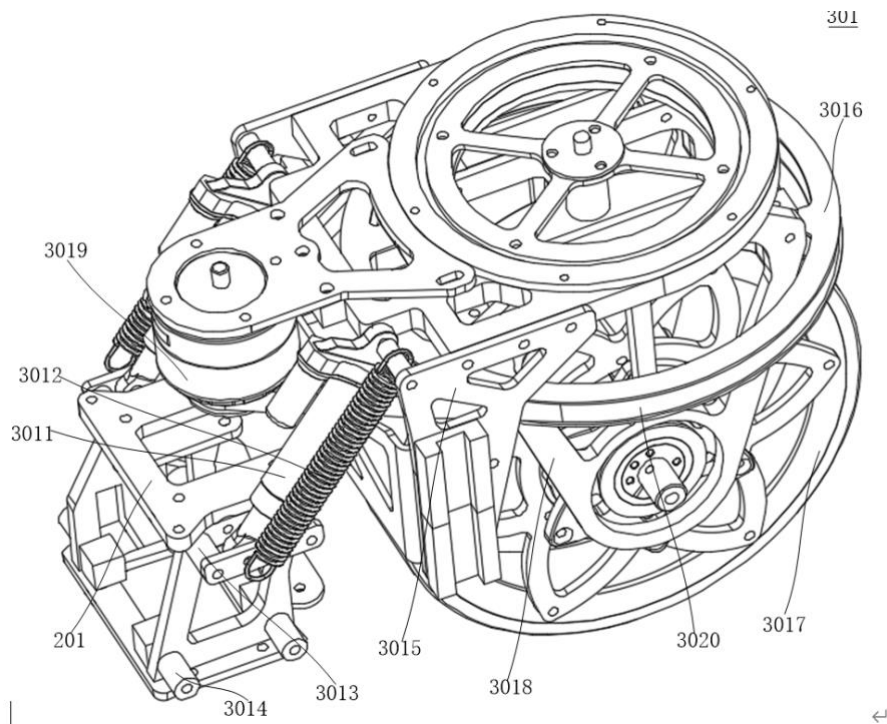
飞坡能力：在上一代的飞坡测试中，经常会出现大倾角落地导致翻车的情况，为了避免此类情况的发生，我们为其设计了飞坡导轮。其作用是在以大倾角姿态落地时，导轮变为与地面的第一接触点，利用导轮转动、向前的惯性以及车辆重力的下压使步兵恢复正常姿态。



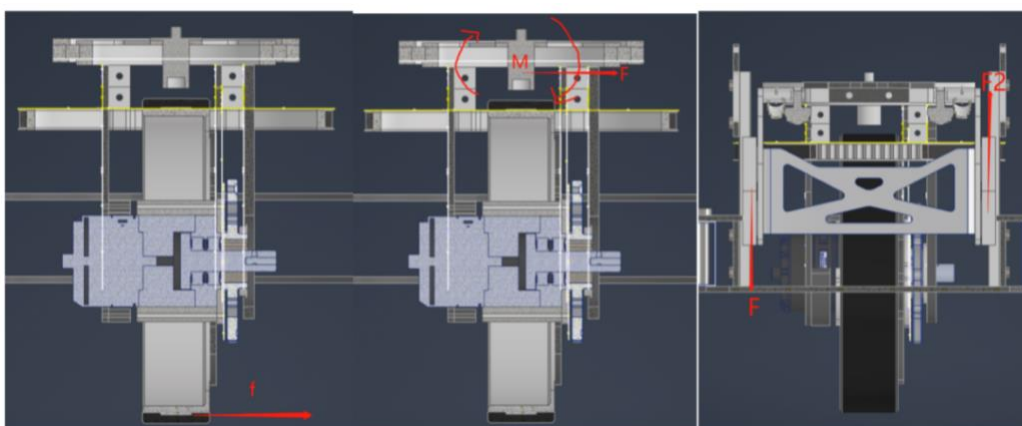
地盘关键模块的保护：在比赛过程中，我们的舵轮归中电路板受到弹丸击打，导致电路连接不稳，功能失效。为了保护这块异形电路板，我们一开始的方案是将其包裹在整车保护壳内部。但是由于自适应地盘的特殊性，该想法实施的话会大幅降低云台的俯角，使其减弱近战能力，所以我们为此单独设计了异形保护罩。



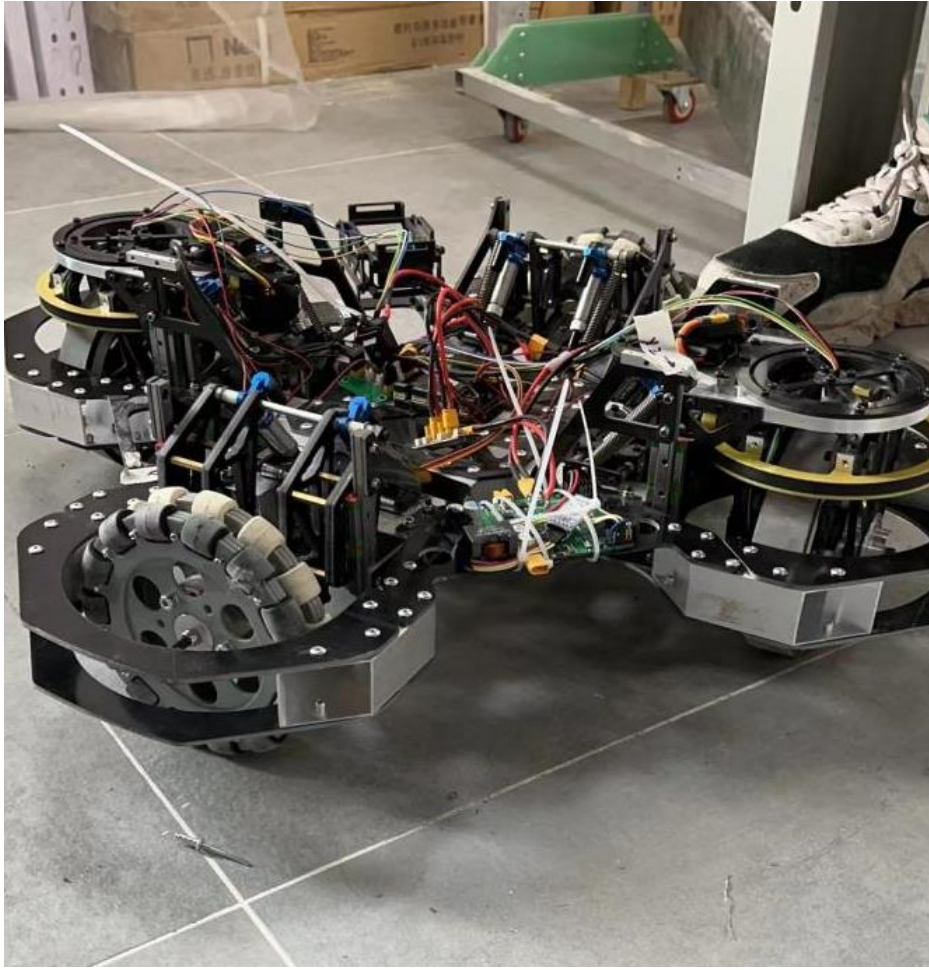
4.1.3.2 舵向结构



为了提高舵轮舵向效率，去年参赛队大多使用的是直驱的 6020 电机作为舵轮舵向驱动。6020 作为一款直驱电机，电流较大。对于舵向电机其效率很低，因此今年的步兵采用 3508 无刷电机作为传动输出电机并加上一比六的减速比作为传动，来保证舵向驱动的效率。传动装置上选择了 7mm 厚度的 3m 同步带作为传动装置。在涨紧结构上选择了变中心距对同步带涨紧。同时同步带带轮使用 8mm 板材进行雕刻，主动轮使用 3d 打印。板材作为同步带轮传动的同时也作为轮组支撑的部分承重零件。减轻了轮组重量，提升了轮组效率。舵向 yaw 轴的轴承选型上，使用了 CN 间隙的 XPO035 等截面四点接触轴承，并对轴承进行了预紧来保证舵向的角向稳定性。同时对轮组进行受力分析后，发现在底盘进行突然刹车时，在轮组根部轴承处存在一个静摩擦力去抵抗车身惯性力。根据理论力学，这个静摩擦力 f 可以等效为轮组根部的一个弯矩 M 和一个和静摩擦力等大的根部受力 F ，同时这个根部受到的弯矩 M 可以等效为一堆支撑轮组根部的力偶 F_1, F_2 。经过以上受力分析，这对力偶可以使得左右滑轨向相反方向运动，使得轮组不稳定，刹车时滑块支撑板材会扭曲变形，为了减少这一挠度，笔者结合受力情况与空间和工艺，设计了一个铝合金 6063 钣金件，来增加轮组支撑末端刚性。



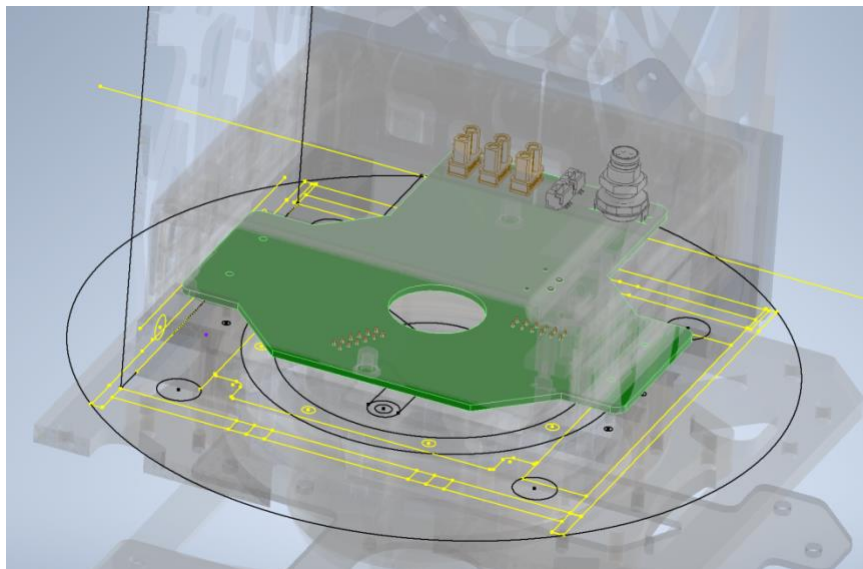
使用钣金件从两个方面考虑，第一是板材在法向上非常抗扭，第二是借助钣金的工艺特性，使得连接左右两块平行的板材只用几颗螺丝，减少了工艺的复杂性。并且成本控制在单个零件 20 以内，做到成本，工艺，强度三得。



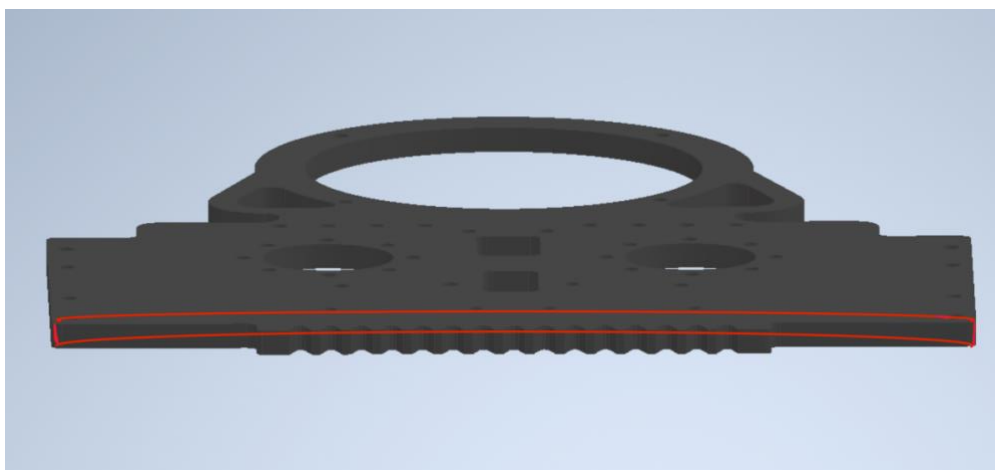
4.1.3.3 云台结构

在云台的等截面四点接触轴承的外侧，上交采用的是外发铝件，且轴向定位螺丝高达 12 个，经过受力分析，我认为这个数量有点冗余，且为了减轻云台整体重量，我将这个铝件改为了板材加 3D 打印加板材的结构，经过后期我们的强度测试，此结构完全能胜任各种工况并且我们的重量减轻了五分之一。

上文提到减小 yaw 轴体积，这一代的步兵吸取了老步兵 yaw 轴转动惯量过大的教训，我们将小电脑作为一个压紧件放置在了 yaw 轴与驱动 pitch 轴旋转的 6020 之间，其次为了保护电路板，我们将小电脑与 yaw 之前的空隙充分利用，做了一个异型的电路板，此举不仅做到了高度一体化，还将电路板完美的保护了起来，可谓一举两得。



在云台的上部分，考虑到高转速下摩擦轮对板材的影响可能会出现如下情况：



所以我们加了一块 3mm 竖版防止出现上述形变。

4.1.3.4 双枪结构

为了满足今年的跑打游击战术，我们决定做第三类也就是福建工程学院这类的一套发射机构两个测速模块的双枪结构，但是我们又于其有很大的不同。

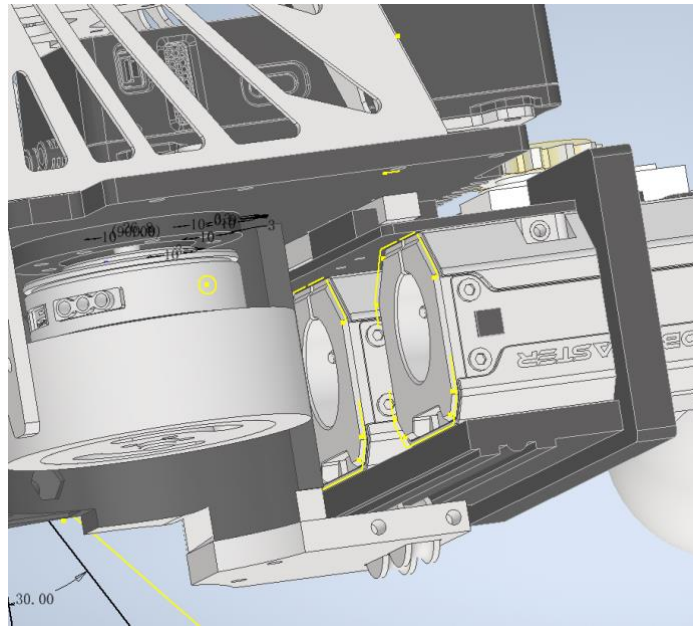
福建工程学院用的是旋转枪管的方式，我们可以看到为了枪管旋转时不干涉，他加高了云台，提高了重心，这样 pitch 轴的转动惯量是大大增加。其次旋转枪管与云台的连接部分只依靠转动轴与其连接，这在高强度的赛场上是极其不稳定的。再者，该设计为了俯角足够在枪管旋转一周的正投影车体上完全空出，这要求底盘只能使用最基础的麦伦底盘（体积较小）这是对俯角的妥协也是一个不好的设计。



我们在设计这个双枪是，打破常规采用了滑轨+齿轮齿条+U 型轴承的平移方案。这个方案有诸多好处：

(1) 平移意味着我们不需要增加云台高度来弥补俯角过小的遗憾，也就意味着我们 pitch 轴的转动惯量比福建工程学院旋转的版本要小。

(2) 滑轨+海倫齿条+u 型轴承意味着我们对枪管的机械限位有两处如图：

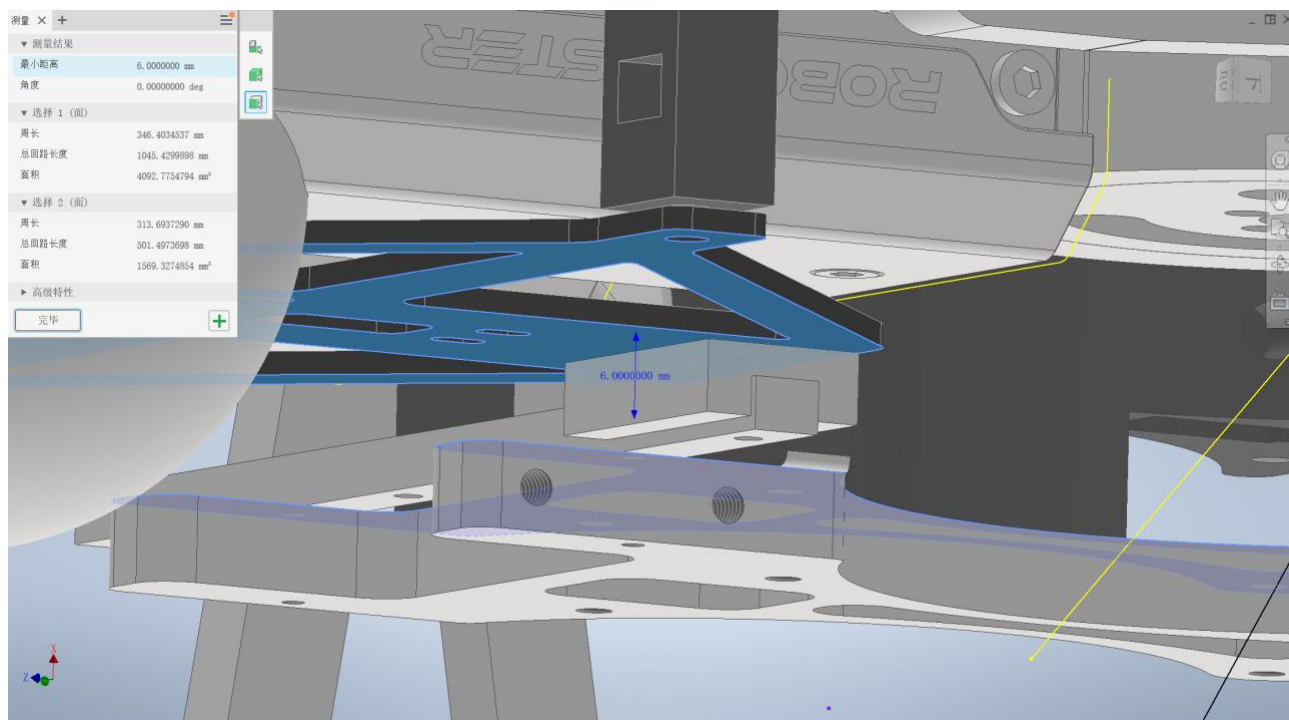


我们可以看到，滑轨和 U 型轴承对双枪管起到了加紧的作用，这样的设计既保证了平移的稳定性还确保了枪管不会因为收到冲击而与云台分离

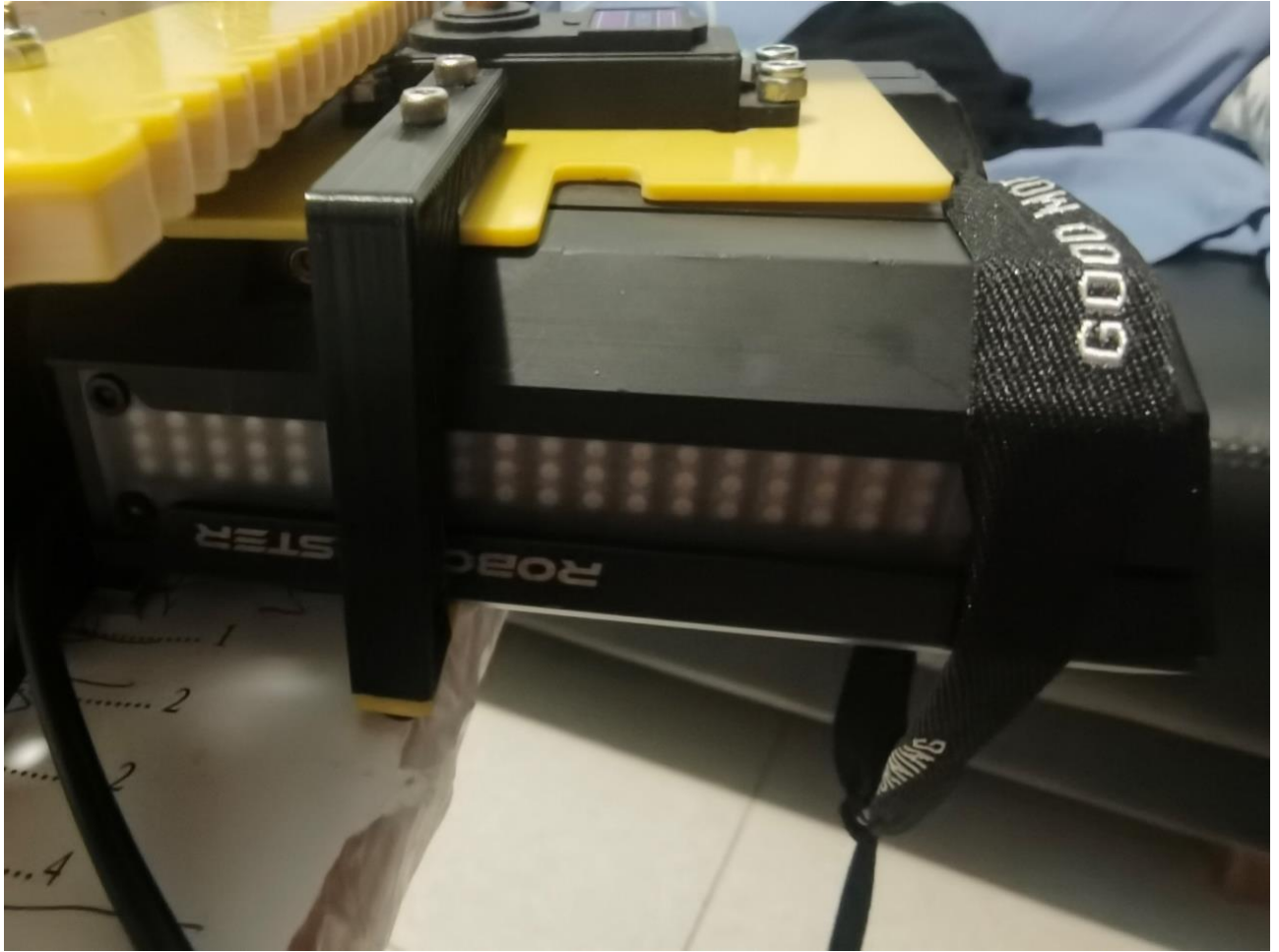
双枪结构优化升级方案：

在这个新的赛季当中，我们制造了双枪部分结构的原型机，经过测试发现，双枪下方的滑槽由于尺寸过小，3d 打印误差过大导致滑槽的平顺性以及轴承导向能力不符合预期，所以我

们更换了新的设计，采用 MR6M 滑块，该滑块与滑轨的组合体积不仅小于原设计且强度也大大增加，这对于空间利用率以及结构强度提升很大



经过实际测试，单枪管负重 1.11kg 在 1min 时形变如下图，结构强度远超实际工况所需。



(3) 在制作成本上我们也远比旋转枪管的方案要低。本方案转换枪管只需购买一个 996 舵机以及两个微动开关即可。在精度方面微动开关选择的是

(<https://item.szlcsc.com/299976.html>) 它的行程只有 0.3mm，此行程对于一个内径 21mm 的枪管和 17mm 的弹丸来讲微不足道（或者说就算产生了误差也不会对发射出的弹丸产生干涉），所以在精度上他也是满足要求的。

当然，这个设计方案并不是那么完美。为了平衡两枪管和 996 舵机以及各种板材、3D 打印件带来重量上的增加，我们只能把弹仓向后移动，这也使得我们的 yaw 轴转动惯量增加。然后就是平移枪管这种不对称设计对于电控的调试造成了极大的影响。在子弹刚加满与子弹打空两种极端情况之间，重心的偏移量是不确定的。再者当我们操作手要一边换枪管一边操控云台的移动时，对于平移的精准程度是不太友好的。

总体来讲，理论上平移方案所带来的优点完全可以盖过他的缺点，所以我队认为双枪方案的设计还是很成功的。

舵机选型：对于舵机选型，讲究适当，即能够在可预想的工况下都可以正常使用。经过计

算，舵机所要带动的质量在 420g 左右。通过筛选工作扭矩达到 13kg/cm 的符合要求，且我们云台上还剩有一个 5v 的接口也方便了电路所以就选了用了 MG996R 舵机。

03:尺寸: 40.7*19.7*42.9mm

04:重量 : 55克

05:反应转速: 无负载速度0.17秒/60度(4.8V); 0.13秒/60度(6.0V)

06:堵转扭矩;

07:工作死区:4微秒

08:插头规格:JR FUTABA通用

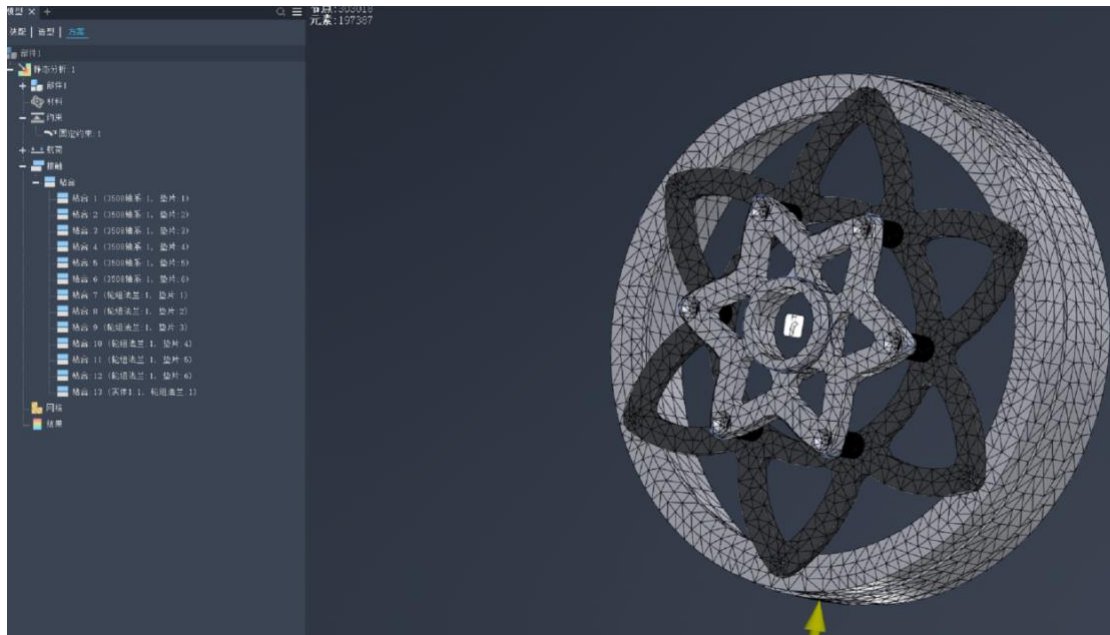
09:工作电压; 3.0V-6V

10:工作扭矩: 13KG/cm

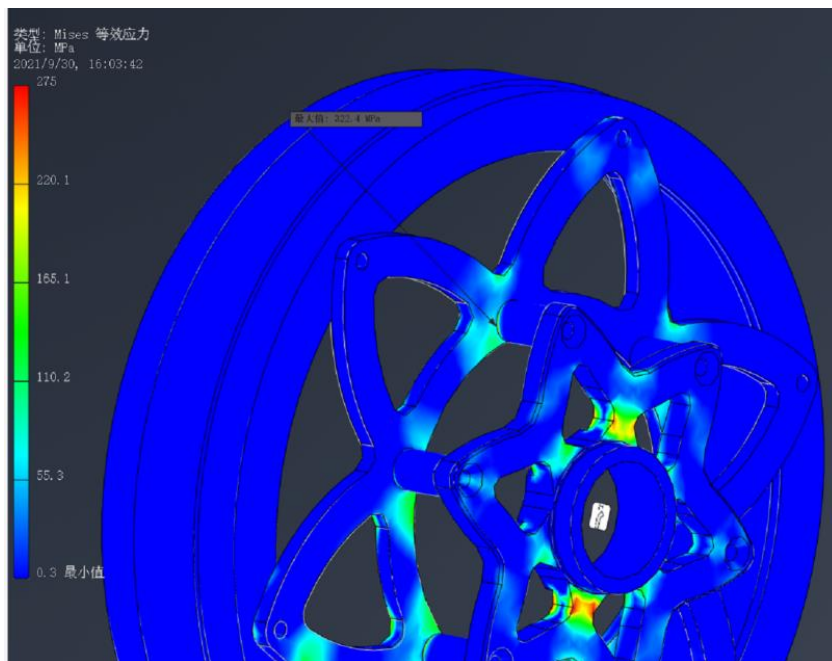
4.1.3.5 轮组互换性设计与可靠性分析

我们在这里从实用角度出发，静力学分析仅仅在我们设计结构时，仅仅用于当结构设计出现类似悬臂梁等总体结构看来并不合理，挠度可能较大的总体结构时，对关键结构件进行受力分析，并对关键材料实用情况进行校核的一种方式，静力学分析的本质目的在于校核。这里从两个案例出发。

为提高单轮组可互换性以及降低单舵轮轮组的 yaw 转动惯量，我们设计了一种外圈铝包胶轮可更换的结构，轮系可以按照需求更换不同轮径的轮组，同时拆下的轮组可以更换法兰，给其他的兵种使用（如飞镖也需要大动量的摩擦轮）但是由于为了平衡轴系惯量，让轴系惯量最小化，在设计轴系时将轮组截面设计为如图的半悬臂状。为了验证结构可靠性，我对此轮系进行了可靠性分析。对于单轮组的最大瞬时受力，对飞坡后的步兵进行了受力分析，估算出单个轮组最大受力大小不会不会超过 1000N。在进行仿真校核时，留出安全系数，使用 1400N 进行校核。为了使得仿真结果符合真实环境，对轮组上添加面进行部分受力近似。并在网格划分时确定好各结构连接方式以及对应材料。同时对不用的原件大小进行了不同粒度的网格划分，并进行了手动微调网格，在重点受力处进行网格细化。得到轮组边界条件和网格划分如下：

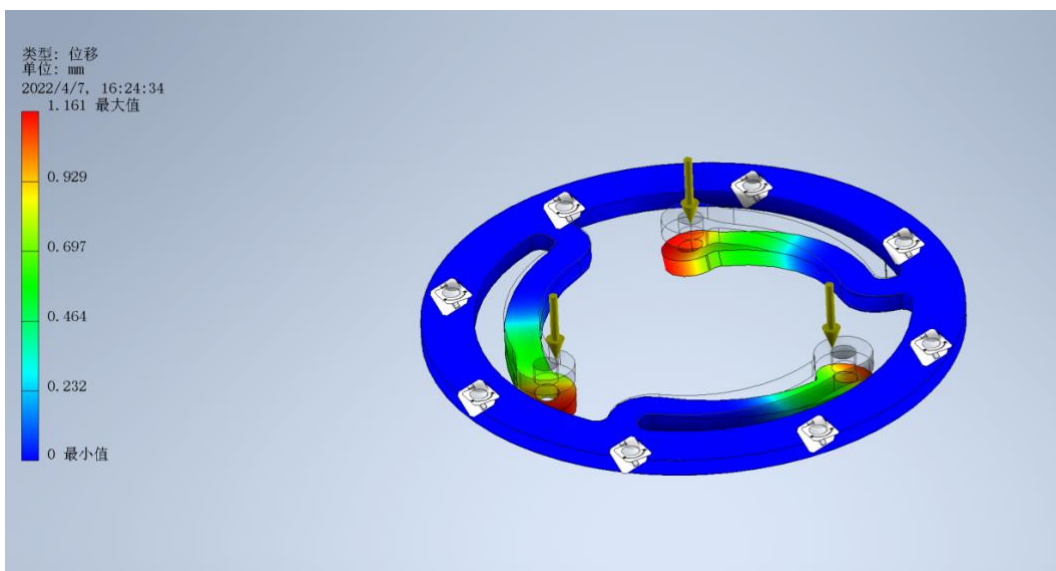
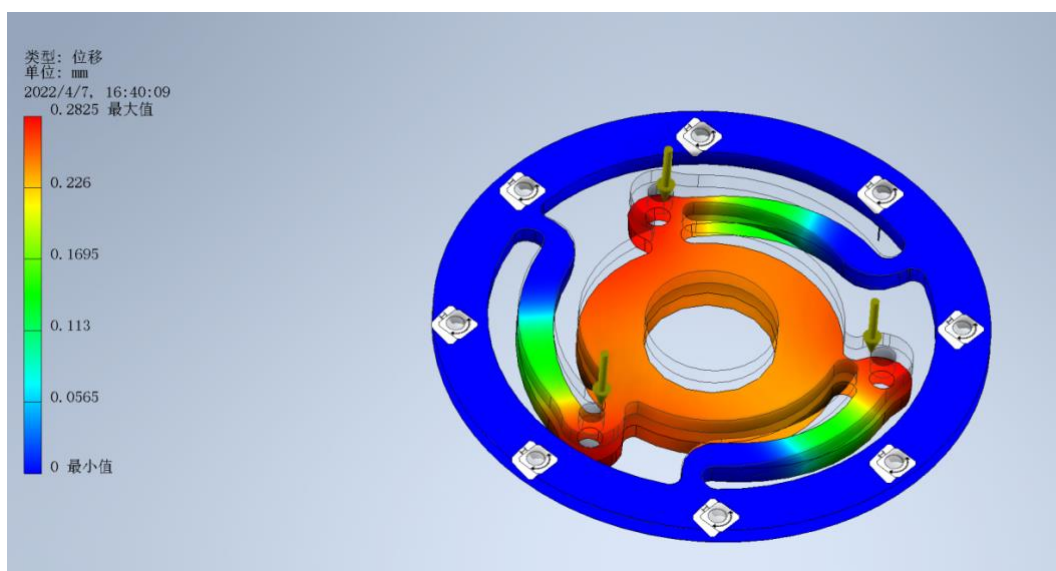


最后得到如图所示结果。根据静力学仿真发现，轮组中心铝件减重不合理，轮组中心应力过于集中。同时使用螺栓连接的尼龙通柱根部受到正应力超过材料屈服极限 67Mpa，应将尼龙通柱更换为铝通柱。



在云台 yaw 轴部分，我们参照上交的“蚊香板”进行了改进，蚊香板的本质是挠性联轴器用来释放同轴度，所以要求挠度达到一定范围才能满足要求。大体设计思路不变，依旧是利用大力臂产生挠性形变，但是我队认为上交的版本挠性过大，考虑到 yaw 轴的小体积、6020 的 can 线在以及电源线在侧边的安全性（不被 yaw 轴内壁挤压），所以我们采用了三力臂的形式。在确定方案后，我队开始着重设计。起初考虑到力臂数量的增加那么就要在承载力臂

的板材大小上找补回来。经过数次静力学仿真模拟如下图一，我发现轴向的挠度始终不够，无法释放同轴度。后来我们发现蚊香板与 6020 连接的三颗螺丝已经起到了固连的作用那么中间的板材连接就可以省去，再次测试如下图二，轴向挠度提升了一个等级，且挠度达到一定范围，即这块蚊香板达到了使用要求。我们预计这块蚊香板允许的最大装配误差在 1.2mm 以内。



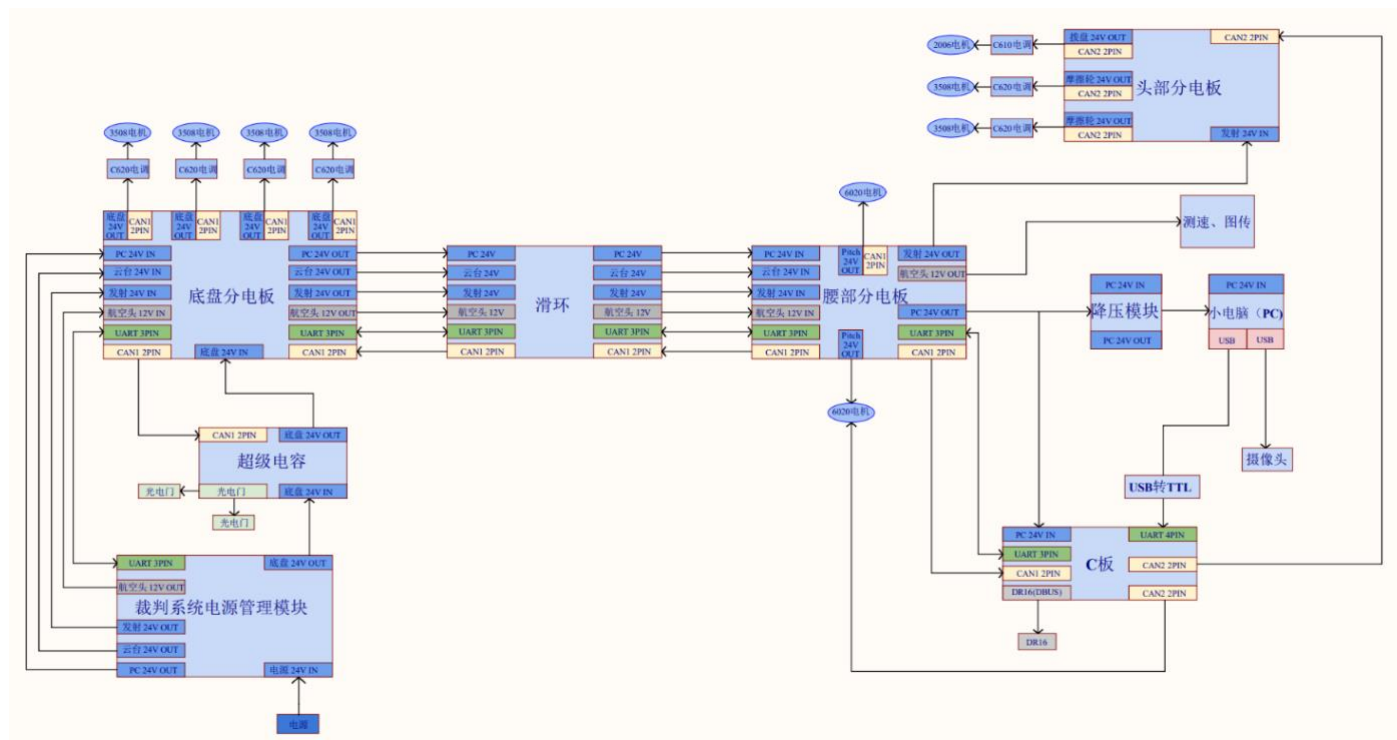
通过静态力学仿真，我真切的对轮组结构使用材料和减重进行了修改，本次校核并不是为了应付技术报告的随便设计的边界条件有个应力分布就来糊弄评委的，而实通过静态力学仿真实实在在降低了试错成本，提前对高风险部分进行了试错，提升了研发效率。

4.1.4 机械结构总结与展望

综上所述，本步兵现阶段测试表现结果结构稳定。但尚有问题没有解决。还有改进和提升空间，例：现有双舵轮仍然存在救援拖阻力大的问题，同时，现有驱动轮为 150mm 相对较大，传动方案选择同步带较为占用体积，下一个版本的舵轮步兵可以使用齿轮作为传动机构，减少传动机构重量，同时减少轮径到 120mm 以提升加速能力。120mm 轮大小完全满足 rm 战场需求的通过能力。同时舵向轴承选型尺寸相对较大，下一版本可选择为体积和质量相对较小的 xpo025 轴承，进而继续减少重量，现有步兵全车车重在 13kg，下版本迭代后重量预计在 11kg 左右，总结构重量可以继续减少，性能进一步优化。

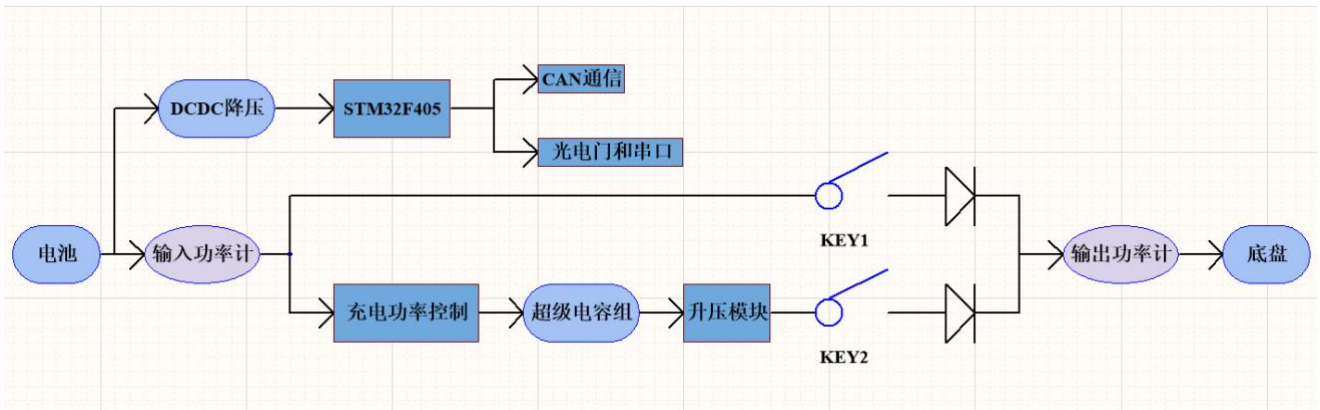
4.2 硬件设计

4.2.1 整机硬件框图



步兵机器人在底盘，腰部 yaw 轴和头部分别根据空间和位置设计安装了三块分电板。其方便步兵机器人更好的走线，采用 XT30 接口供电，有 CAN1，CAN2 从 C 板采集信号控制电机，同时有航空头，UART 等通过分电板连接方便拆卸。整车电源由 24V 电池供电，通过电源管理模块分为底盘、云台、发射、PC 四组 24V 电，分别为底盘、云台、发射机构、PC 及 C 板供电。四组电通过 XT30 口输出到底盘分电板，底盘电为四个 3508 电机供电，云台、发射、PC 通过滑环电源线接到腰部分电板。通过腰部分电板云台电为 yaw 轴和 pitch 轴两个 6020 电机供电。发射电通过 XT30 口输出到头部分电板为拨盘的 2006 电机和两个作为摩擦轮的 3508 电机供电。PC 电源一分二，一根线通过降压模块从 24V 降压到 19V 为 PC 小电脑供电，另外一根接入 C 板为 C 板供电。从 C 板引出的 CAN1 信号控制腰部分电板的 Yaw 轴 6020 电机，再通过滑环引入到底盘分电板，控制底盘四个 3508 电机，最终接入超电。CAN2 信号控制一个 Pitch 轴的 6020 电机还有发射机构的 2006 拨盘电机和两个 3508 的摩擦轮电机。

4.2.2 自研超电



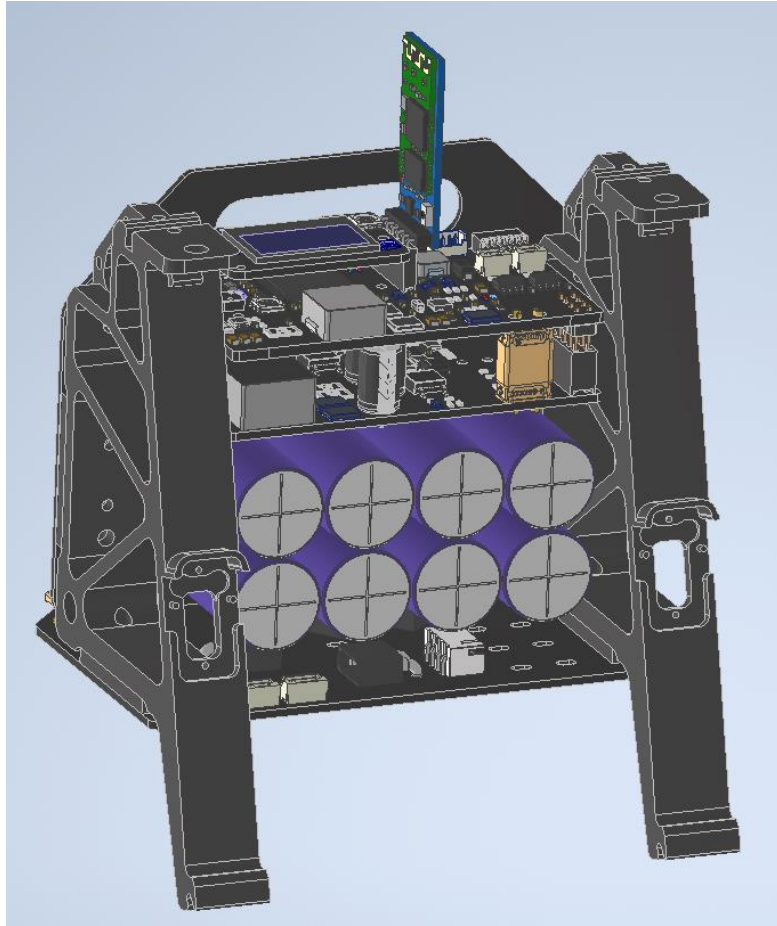
超级电容的整体设计思路与充放电策略原理图如上所示，总体设计思想：电源切换。在控制总开关使总功率恒定不超过所设置最大输入功率的前提下，一般有以下两种情况：

(1) 当用电器功率小于设定总功率时（即一般平地行驶过程）：此时超级电容 **KEY1** 打开，**KEY2** 关闭，升压模块开关关闭，充电模块开关打开，超级电容为充电状态且充电功率为输入功率减输出功率。达到利用多余功率给超级电容充电的目的。

(2) 当用电器功率大于设定总功率时（即加速行驶、爬坡时）：此时超级电容 **KEY1** 关闭，**KEY2** 打开，升压模块开关打开，充电模块开关关闭，超级电容为放电状态，输出功率即等于超级电容放电功率。达到“超功率”输出的目的。当超级电容电量小 8V 时切回充电模式。

一句话来说，底盘电源是在低功率电池供电和高功率超级电容供电两种供电模式之间切换。最终使机器人在整个行驶过程中都不超功率且实现电池功率的最大化利用并保证各类行驶状态的稳定。

在结构上，配合 8S 电容的尺寸与布局，最终采用了上下两层板的布局结构来将尺寸尽可能的缩小，以配合整个超级电容模块在步兵上的安装。



4.2.3 关键器件选型

4.2.3.1 充电模块

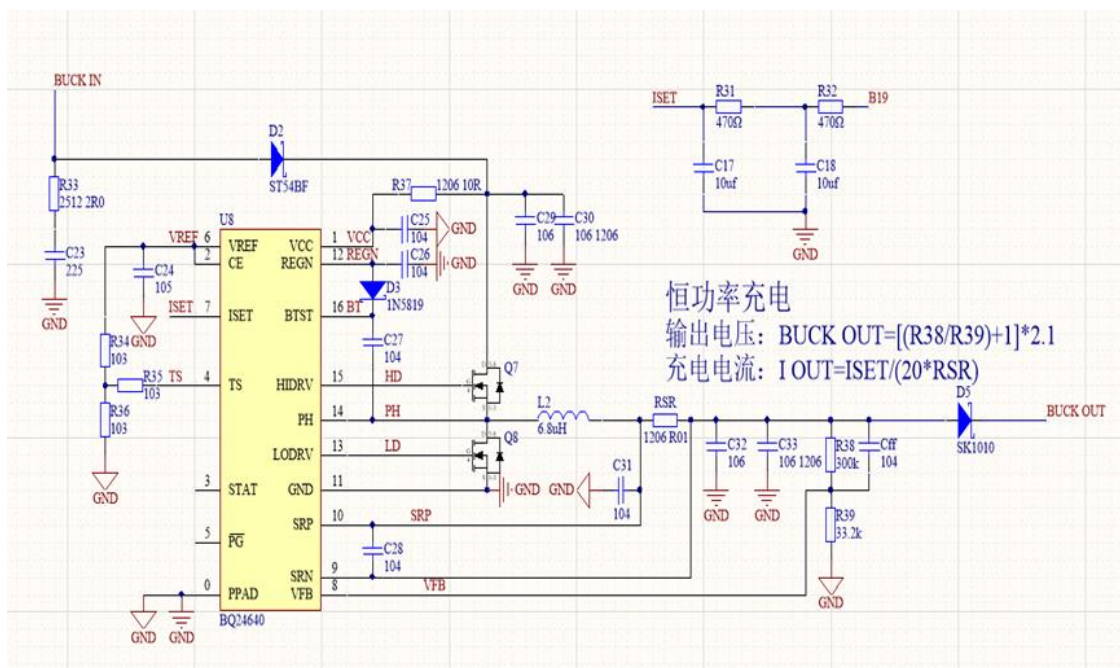
BQ24640 是一个开关模式控制的超级电容充电器，通过 HIDRV 和 LODRV 的两个高频 PWM 信号控制两个功率 MOS 管开关降压输出。芯片可以通过两个反馈电阻设置超级电容充电电压，相应公式为：

$$BUCK\ OUT = [(R38/R39) + 1] \times 2.1$$

并且可以通过 ISET 引脚设置充电电流的大小，相应公式为：

$$I_{OUT} = I_{SET} / (20 \times R_{SR})$$

利用这点，可以在设定最终充电电压的基础上，配合超级电容实时的电压值来改变充电电流的大小，从而实现控制超级电容恒功率充电的目的。还有 STAT 和 PG 两个引脚可以用来监测充电过程是否正常进行。

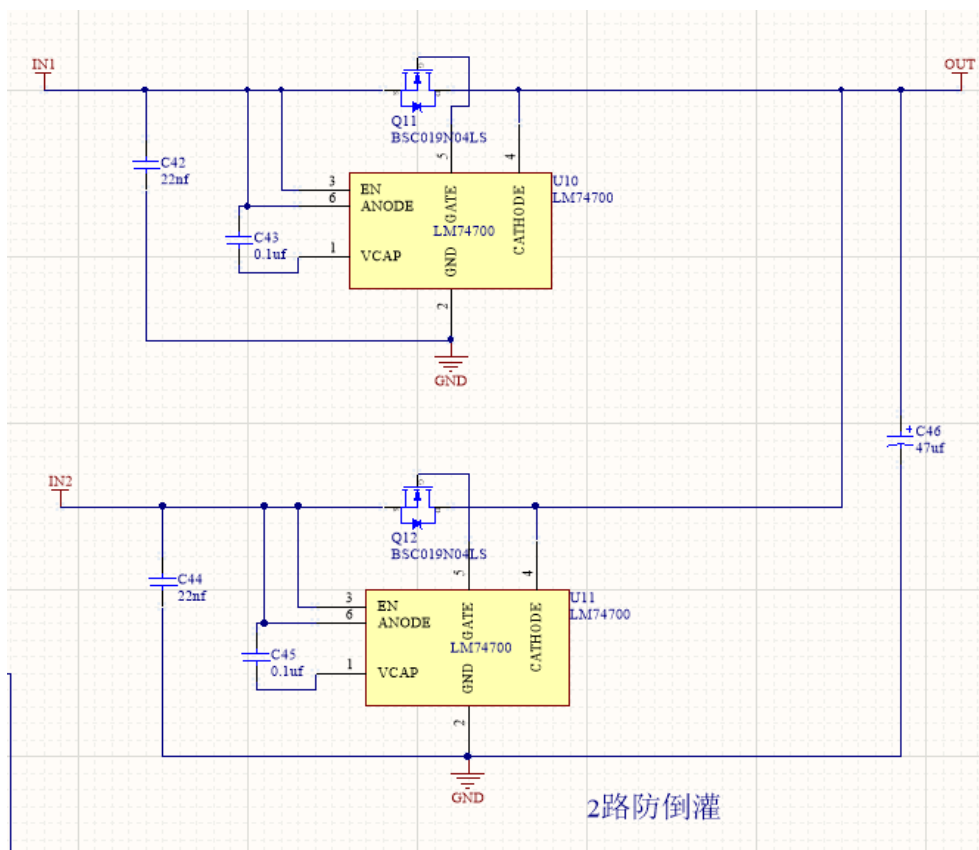


4.2.3.2 理想二极管模块

在系统后续输出低功率时（上述情况①），系统的输出电压为 24V，而高功率状态下（上述情况②），系统优先使用由超级电容升压而来的 25V，需要在低功率输出状态时和高功率状态时，两条输出电路互不影响，所以加入两个理想二极管防止电流倒灌，损坏器件。

LM74700 芯片作为理想二极管控制器，与一个 NMOS 组成理想二极管电路。LM74700 是

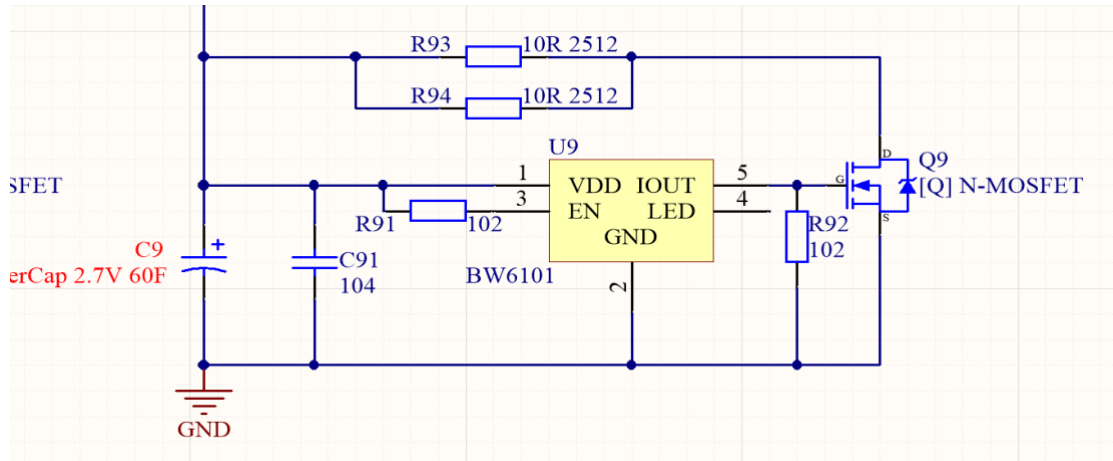
通过控制 MOS 管的 G 级来控制该电路是否导通，当 ANODE 引脚的电压大于 CATHODE 引脚电压时，GATE 脚输出高电平使 MOS 管导通；当 CATHODE 引脚的电压大于 ANODE 的电压时，GATE 脚输出低电平使 MOS 管断开，即防止大电压流向小电压，影响输出和前置电路，做到了一个类似于二极管的功能。



4.2.3.3 超级电容模块

超级电容模块采用单独的 2.7V 60F 的超级电容，将 8 个相同的电容串联在一起，组成 21.6V 7.5F 电容组，总容量 1556J。

并且采用 BW6101 超级电容保护芯片配合外围电路为每个电容增加了一个保护电路，防止出现单个电容过充的现象。当某个电容过充时，BW6101 的 IOU_T 引脚就会输出高，使 MOS 导通，以两个大电阻 R93、R94 消耗能量，降低其电压。



4.3 软件设计

4.3.1 系统架构



4.3.1.1 软件系统各层功能简介

(1) 硬件层

硬件底层驱动（硬件功能包括但不限于 GPIO, ADC, DAC, DMA, UART, I2C, SPI, CAN），并为上层系统提供 API 函数接口

(2) 功能模块层

利用硬件层 API 函数对所需功能模块进行开发利用（功能模块包括但不限于基础库模块，初始化模块，控制算法模块，信号处理模块，坐标转换模块，外设库模块，操作系统模块，校验模块），并为上层系统提供 API 函数接口

(3) 逻辑层

利用下层系统提供的函数进行代码逻辑的编写，满足不同结构需求（包括但不限于底盘 chassis, 云台 gimbal, 射击 shoot, 远程控制 remote_control, 裁判系统 referee, 调试校验 debug）

远程控制 remote_control: 该部分主要是用于遥控器和键盘控制机器人的不同行为。

裁判系统 referee: 该部分是实现裁判系统的发包和解包，以及自定义 UI。

底盘控制 **chassis**:该部分主要用于步兵机器人的舵轮底盘解算以及控制底盘行动,对舵轮方向轮进行角度闭环控制,驱动轮进行速度闭环控制,实现底盘的全向移动。

云台控制 **gimbal**:该部分主要用于步兵机器人的云台解算以及控制云台行为。

射击控制 **shoot**:该部分主要用于步兵机器人的射击行为控制。

自校验功能 **debug**: 该部分主要用于程序自校验以及硬件下线检测,防止出现错误。

(4) 应用层

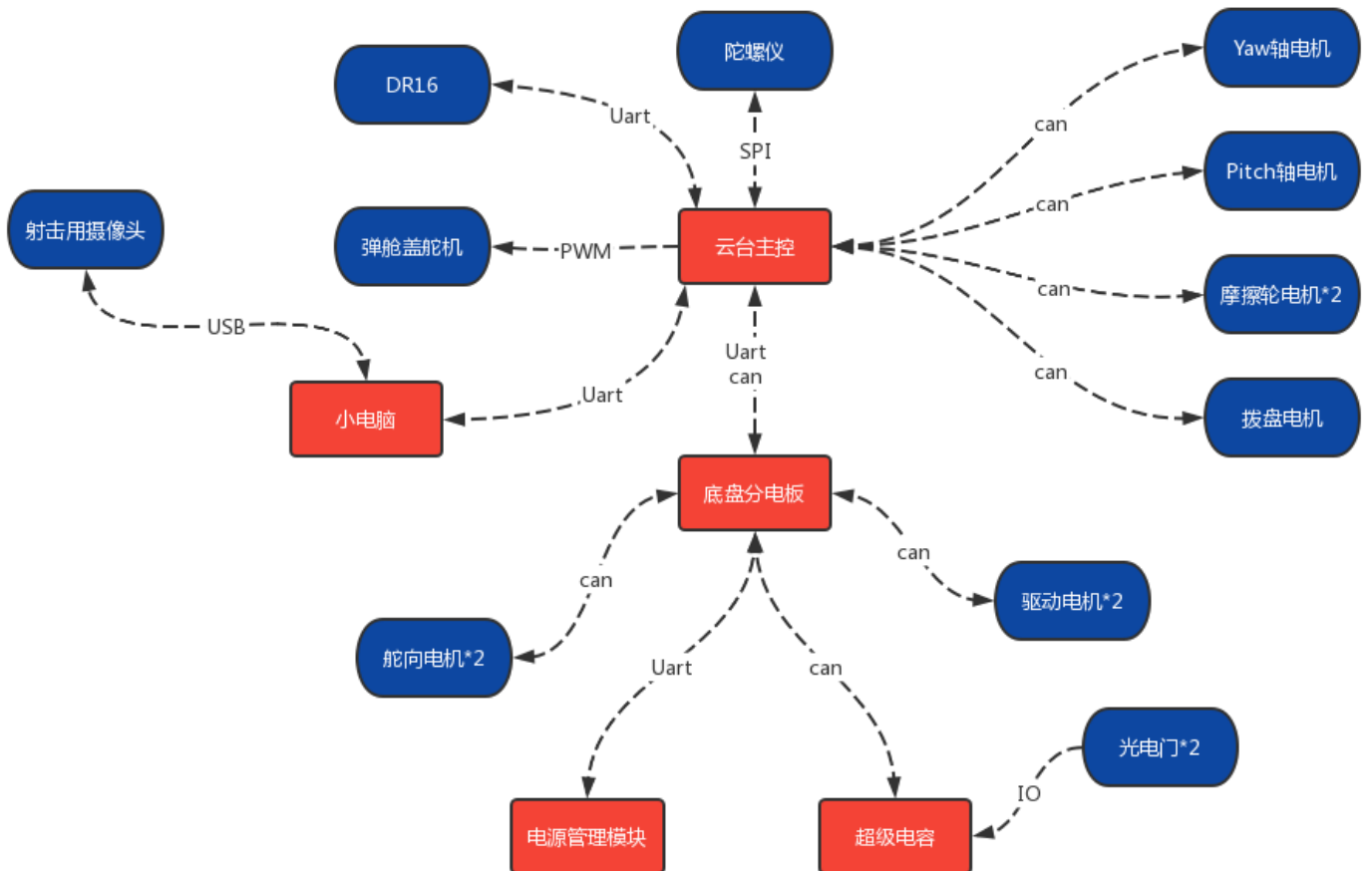
整合逻辑层,实现整车功能

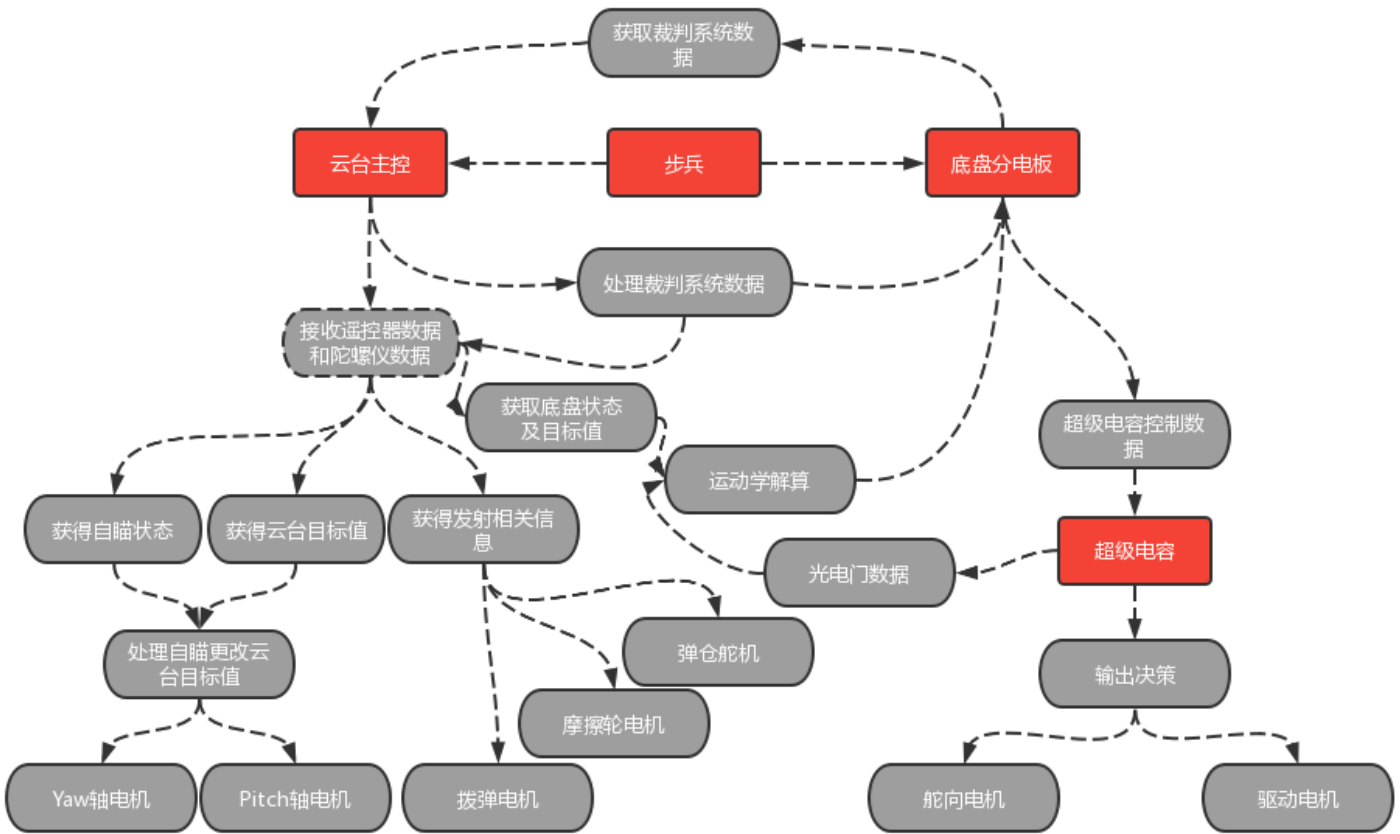
4.3.1.2 开发环境

使用 Keil MDK 进行代码编写与仿真调试。在实际编写代码的过程中,为了提高代码的运行效率,合理、有效利用 CPU 资源,使用了 FreeRTOS 操作系统,实现多任务并行处理。为了方便代码的日常维护及整合,满足多队员同时开发需求,使用 gitee 平台来进行代码的管理。

4.3.2 运行流程

下图分别为软件数据通讯流程和软件数据处理流程：





4.3.3 重点功能

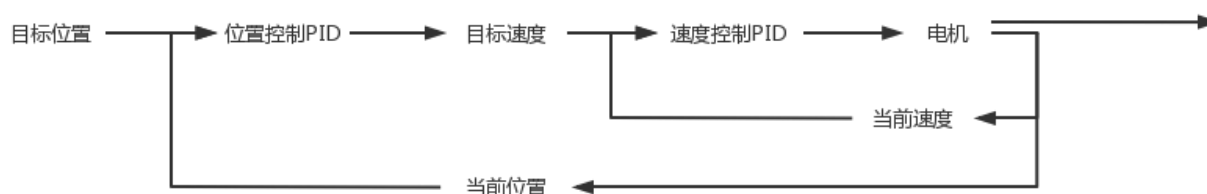
步兵底盘由原本的麦克纳姆轮改进为双舵轮底盘，通过实现对舵向电机和驱动电机的控制，使机器人在原地转向时大幅度减小横向摩擦力进一步提升步兵的机动性。

软件控制时先基于舵轮底盘的算法实现基础的全向移动与小陀螺功能，然后不断改进。

主要需要解决的问题是随动控制时舵向控制不精确，随动滞后及小陀螺移动的运动分量的分配。

针对舵向电机，使用串级 PID 控制即内外环控制，外环为角度环内环为速度环，以增强对舵向电机的控制使各轮达到同步减小角度偏差带来的影响。

驱动轮使用单环 PID 控制。



在底盘运动优化过程中，选择最合适的功率限制方案，超级电容与电源串行输出。

为了解决随动控制滞后问题，使用前馈算法，优化响应。

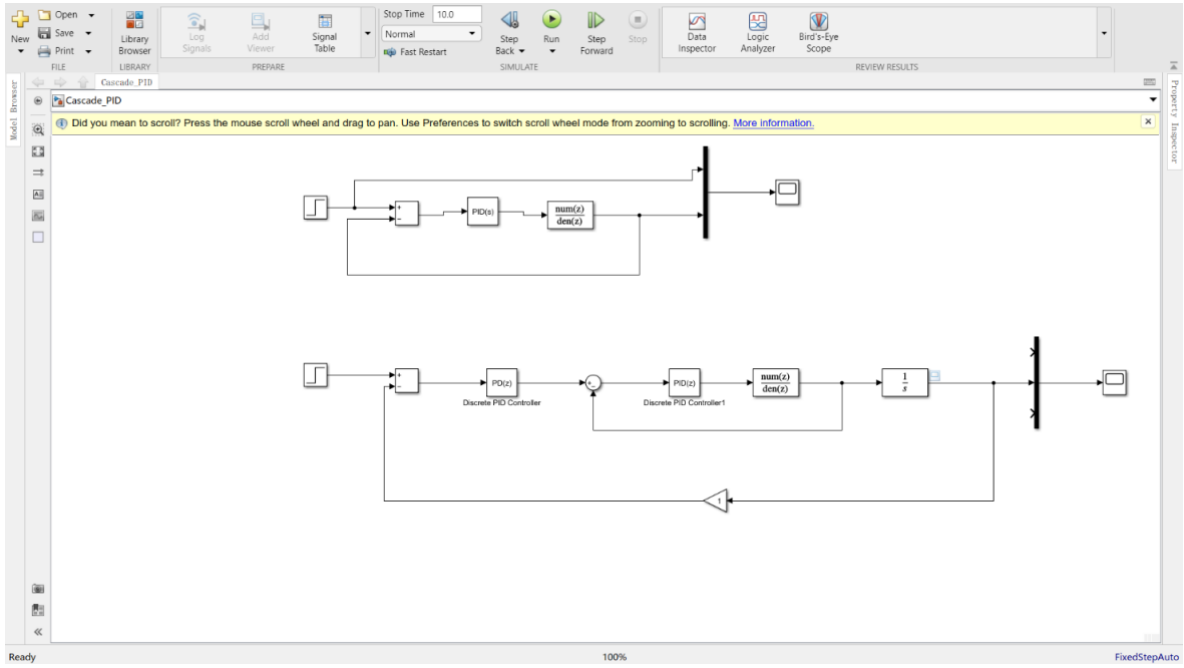
摩擦轮电机的控制算法，解决摩擦轮在发射间隔速度下降的问题，提高弹道的精准性。

云台控制，针对上一赛季陀螺仪使用过程中零飘较大的问题，改进陀螺仪数据融合及滤波算法，大幅度优化陀螺仪零飘问题。

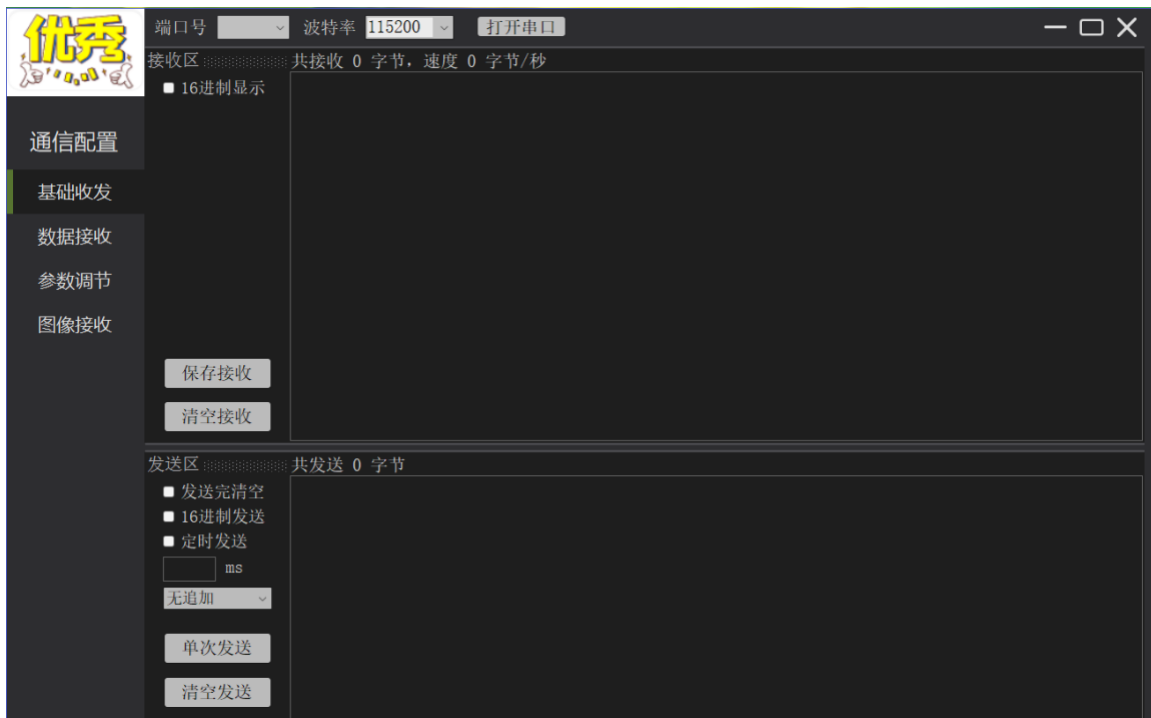
Yaw 轴和 Pitch 轴电机均使用双环 PID 控制，减少角度偏差。

为了解决调参问题，同时使用 matlab 进行 PID 模型构建仿真及自制调参上位机。

下图为 Matlab 仿真：



下图为自己设计的调参软件及调参界面：



4.3.4 软件测试

4.3.4.1 测试方案

软件测试流程如图软件测试方案设计所示，具体步骤如下：

(1) 单元测试

把大型的嵌入式软件系统划分为若干个相对较小的任务模块。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。

Driver_2		Driver_1	
单环PID		单环PID	
Kp	6000	Kp	6000
Ki	40	Ki	40
Kd	0	Kd	0
MaxIOut	5000	MaxIOut	5000
MaxOut	16000	MaxOut	16000
复制参数	波形显示	复制参数	波形显示
粘贴参数	OK	粘贴参数	OK
	发送参数		发送参数

在单元测试阶段，也可以把大的模块划分成小的模块。在程序内部，小模块之间数据传递的入口设计接口函数，要用于快速地定位错误。用模块嵌套的思想进行软件测试，需要模块内部结构清晰，数据链路简单。

(2) 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。本阶段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。

(3) 确认测试

确认测试是在模拟的环境下，运用黑盒测试的方法，验证被测软件的功能和性能及其他特性是否与要求一致。

(4) 系统测试

集成测试完成后，完成应用到现场环境中的移植，从队员的角度对系统进行黑盒测试，以

验证每一项具体的功能。

系统测试阶段应该进行意外测试和破坏性测试，即测试系统正常执行情况下不该发生的活动和人为的破坏性的测试，进一步验证系统性能。

(5) 验收测试

验收测试是最后一个测试操作。验收测试就是进一步验证软件的有效性，使软件的功能和性能如同我们所合理期待的那样，确保软件准备就绪。

(6) 测试完成

在测试完成后进行测试结果分析，测试结果分析可以定位错误，指导程序员修改代码，同时指出进行测试的程序进一步测试的方向。

结合以上原则，我们设计了如下测试用例模板：

测试编号	测试名称	测试项目简介	测试条件	测试步骤	期望结果	实际结果

4.3.4.2 已完成测试情况

下面简要介绍部分已设计完成测试：

(1) 001.

测试名称：底盘解算测试

测试项目简介：本次实验室对于步兵底盘的机械结构方面选择了舵轮底盘结构，因此对于电控舵轮解算有一定要求。例如舵轮运动解算，小陀螺算法。

测试条件：舵轮拼装完成，电控代码书写完成。

测试场地：10 平米平地即可。

测试步骤：电控成员会使用遥控器对舵轮底盘单元进行黑盒测试，即给出一个输入方向，观察其作用效果。

测试结果：可以实现平移旋转等基础操作，舵轮能够正确快速的响应。

(2) 002.

测试名称：底盘功率测试

测试项目简介：由于本次实验室选用新的舵轮底盘结构，需要在电控解算测试之后加入超

级电容模块并进行功率测试，以对电控与电路方案确定提供建议。

测试条件：完成底盘解算测试，超电模块接入，以及一个返回功率值的上位机。

测试场地：地胶地面，需要有颠簸路段与坡道

测试步骤：全速直线运动、左右迅速平移、飞坡、颠簸路段……，并将功率由串口发送到上位机观察其峰值与平均值

测试结果：得到可靠准确的功率数值

(3) 003.

测试名称：发射机构功能测试

测试项目简介：发射机构功能需要软件对 yaw 与 pitch 轴以精确迅速的控制，由于拨弹轮存在摩擦力或者其他阻力。

测试条件：发射机构组装完成

测试场地：长为 10m 并且拉防护网的地面与长度大于 20m 的空旷地面

测试步骤：集成发射测试，8m 发射测试，使用发射装置对目标进行打击，记录每次打击距离目标中心的距离以确定发射精度

测试结果：8m 发射测试击打精度 100%

(4) 004.

测试名称：整车集成测试

测试项目简介：在整车完成后进行不断的测试，优化功能。

测试条件：整车出现完整形态，代码书写完成。

测试步骤：使用黑盒测试以测定其各个单元经整合之后是否正常工作，之后进行压力测试，观察其在人为干扰因素条件，或者极端地形条件等极端测试条件下其表现状态。

测试结果：各个模块工作正常，功率符合组委会标准，提出修改建议并最终使整个系统有很强的鲁棒性。

测试队员应将测试结果同每次的测试环境记录在测试记录表上，记录试验的重点部分。

测试结束之后应该通过 Excel 或者其他软件进行数据处理，图像拟合以使试验结论可视化，更有效化，更有实战参考意义。

以摩擦轮测试为例，摩擦轮测试对于实验环境的要求比较严苛，需要记录摩擦轮间距、硬度、材料、子弹在离开摩擦轮的自旋速度，子弹离开摩擦轮的在某一个方向的轨迹变化、摩擦轮电机波形等等……这样就形成了一个良好的测试体系。测试要求当摩擦轮转速一定的时候每次发射速度都几乎相同，因此需要连入裁判系统，将每颗弹丸的速度返回到上位机，遇到异常情况例如速度有一次过快或者过慢应继续试验，尽量做好试验记录表与拍摄记录以求完成复现，之后寻找问题并结合试验，进行问题分析，电控可以思考程序方面可以解决什么样的问题，优化程序，调整数值，机械可以通过修改结构的方式进行试验，试验流程等相关试验操作与方案设计相同，用数据拟合找到规律解决问题，留存完整测试内容、测试问题、测试结果、测试环境记录。并最终为完善电控代码逻辑提供参。

4.4 算法设计

4.4.1 整体介绍

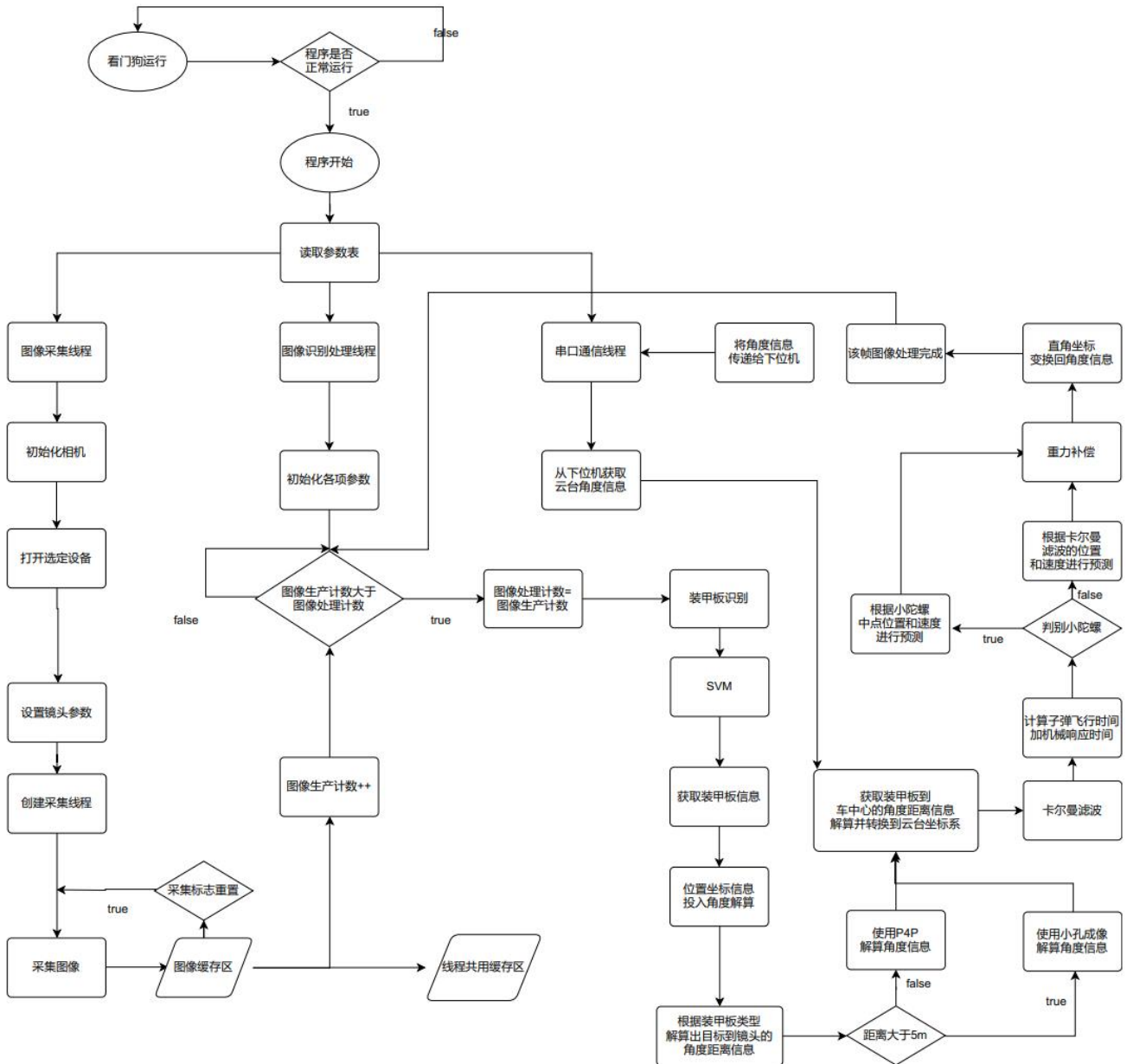
4.4.1.1 功能介绍

视觉部分功能模块主要有相机驱动、装甲板识别、能量机关识别、角度解算、角度预判、以及串口通信。

模块	功能
相机驱动	大恒相机 SDK 封装，实现相机参数控制及图像采集
装甲板识别	根据灯条匹配装甲板，筛选出最适合击打的装甲板
能量机关识别	识别出需击打的扇叶目标
角度解算	解算目标距车中心的角度、距离信息
角度预判	根据位置和速度求解计算待击打位置的云台角信息
串口通信	与下位机通信，传输目标角度信息

4.4.1.2 整体框架

程序流程图如下：



4.4.2 算法原理及公式推导

4.4.2.1 卡尔曼滤波

(1) 基础卡尔曼滤波

基础卡尔曼滤波的公式如下：

$$x_k^- = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} \quad (1)$$

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (2)$$

$$K_k = \frac{P_k^- H^T}{HP_k^- H^T + R} \quad (3)$$

$$x_k = x_k^- + K_k(z_k - Hx_k^-) \quad (4)$$

$$P_k = (I - K_k H)P_k^- \quad (5)$$

(2) Singer 模型

Singer 模型算法是一种先验机动模型算法，在复杂环境下，常见的匀速和匀加速模型在目标发生机动时，跟踪误差较大。Singer 模型可以实现较为平稳的跟踪机动目标。

Singer 模型算法认为在该模型中它假定目标的机动加速度服从一阶时间相关过程，连续模型状态方程可以描述为：

$$\begin{bmatrix} \square \\ x \\ \square \\ x \\ \square \\ x \\ x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \square \\ x \\ \square \\ x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} v(t) \quad (6)$$

其中 α 是目标的机动频率， $v(t)$ 为高斯噪声。

由 (6) 可得连续模型中的状态转移矩阵为：

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -\alpha \end{bmatrix} \quad (7)$$

当采样间隔为 T 时，离散的系统状态方程可以描述为：

$$x(k+1) = F(k)x(k) + v(k) \quad (8)$$

通过对 (7) 式进行拉普拉斯变换，可以得出：

$$F(k) = e^{FT} = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{\alpha T - 1 + e^{-\alpha T}}{\alpha^2} \\ 0 & 1 & \frac{1 - e^{-\alpha T}}{\alpha} \\ 0 & 0 & e^{-\alpha T} \end{bmatrix} \quad (9)$$

噪声协方差为：

$$Q(k) = 2\alpha\sigma_a^2 \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中

$$q_{11} = \frac{1}{2\alpha^5} [1 - e^{-2\alpha T} + 2\alpha T + \frac{2\alpha^3 T^3}{3} - 2\alpha^2 T^2 - 4\alpha T e^{-\alpha T}]$$

$$q_{12} = q_{21} = \frac{1}{2\alpha^4} [1 + e^{-2\alpha T} - 2e^{-\alpha T} + 2\alpha T e^{-\alpha T} - 2\alpha T + 2\alpha^2 T]$$

$$q_{13} = q_{31} = \frac{1}{2\alpha^3} [1 - e^{-2\alpha T} - 2\alpha T e^{-\alpha T}]$$

$$q_{22} = \frac{1}{2\alpha^3} [-3 - e^{-2\alpha T} + 2\alpha T + 4e^{-\alpha T}]$$

$$q_{23} = q_{32} = \frac{1}{2\alpha^3} [1 + e^{-2\alpha T} - 2T e^{-\alpha T}]$$

$$q_{33} = \frac{1}{2\alpha} [1 - e^{-2\alpha T}]$$

(3) “当前”统计模型

当前统计模型利用修正的瑞利分布来表达加速度，均值由方差决定，而分布则随着均值变动。因此该模型算法能够很好地识别机动加速度的均值并随时更改加速度分布，并将方差传送到实际的滤波增益中，实现对目标闭环自适应跟踪。

具有根据上一时刻的加速度估计值来自适应过程噪声的能力，目标的当前统计特征为：若目标的加速度发生变化，只能在当前加速度的某一邻域内发生变化，即它的下一时刻的加速度的变化范围是有限的。所以和 Singer 模型算法相比，当前统计模型算法可以更加准确的描

述目标的机动状态以及机动范围的变化，有着较好的跟踪精度。

当前统计模型连续模型状态方程可以描述为：

$$\begin{bmatrix} \square \\ x \\ \square \\ x \\ \square \\ x \\ \square \\ x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \square \\ x \\ \square \\ x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \alpha \end{bmatrix} \bar{a}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} v(t) \quad (11)$$

离散模型为：

$$x(k+1) = F(k)x(k) + G(k)\bar{a} + v(k) \quad (12)$$

与（8）式相比，增加了输入控制矩阵：

$$G(k) = \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha}(-T + \frac{\alpha T^2}{2} + \frac{1-e^{-\alpha T}}{\alpha}) \\ T - \frac{1-e^{-\alpha T}}{\alpha} \\ 1-e^{-\alpha T} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$Q(k)$ 的表达式与（10）式相同，其中当前加速度为正时：

$$\sigma_a^2 = \frac{4-\pi}{\pi} [a_M - \bar{a}]^2$$

当前加速度为负时：

$$\sigma_a^2 = \frac{4-\pi}{\pi} [\bar{a} - a_{-M}]^2$$

4.4.2.2 快速傅立叶变换（FFT）

由 DFT 可得出公式：

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-\frac{2\pi jkn}{N}}, k=0,1,2,\dots,N-1 \quad (1)$$

对于 FFT，要求 $N=2^M$ ，其中 M 为正整数，定义 $W_N^l = e^{-j\frac{2\pi l}{N}}$ (2)

将（2）带入（1），可得出：

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{nk} \quad (3)$$

$$\text{令 } r = 0, 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1$$

则 (3) 式可转化为:

$$X(k) = \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2r)W_N^{2rk} + W_N^k \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2r+1)W_N^{2rk} \quad (4)$$

$$\text{令 } G(k) = \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2r)W_N^{rk} \quad (5)$$

$$H(k) = \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2r+1)W_N^{rk} \quad (6)$$

$$\text{则 } X(k) = G(k) + W_N^k H(k) \quad (7)$$

可知 $G(k)$ 和 $H(k)$ 均以 $\frac{N}{2}$ 为周期, 可以得出 (4) - (7) 将 N 个点的 FFT 转换为 2 个 $\frac{N}{2}$ 的 FFT

通过递归分治的方法, 重复 (4) - (7) 即可实现时间复杂度为 $n \log n$ 的傅立叶变换

4.4.2.3 重力补偿算法

在大多数情况下 17mm 弹丸发射角度接近水平, 因此竖直方向速度分量极小, 故忽略竖直方向空气阻力, 仅考虑水平方向空气阻力对弹丸的作用, 设弹丸水平方向收到的空气阻力大小与速度平方成正比:

当水平速度为 v 时, 水平方向空气阻力:

$$f = -kv^2 \quad (1)$$

$$\text{即 } -kv^2 = m \frac{dv}{dt} \quad (2)$$

对微分方程 (2) 进行求解得:

$$kt = \frac{m}{v(t)} + C \quad (3)$$

其中 C 为常数

由于子弹发射时的水平初速度 v_0 已知, 将 $t=0$ 带入, 得:

$$C = -\frac{m}{v_0} \quad (4)$$

$$\text{因此 } v(t) = \frac{v_0}{k_1 v_0 t + 1} \quad (5)$$

$$\text{其中 } k_1 = \frac{k}{m}$$

对 (5) 在 (0, t) 上对时间积分, 可得子弹飞行距离 x 和子弹飞行时间 t 的关系为:

$$x(t) = \frac{\ln(k_1 v_0 t + 1)}{k_1} \quad (6)$$

通过解算可得出距离目标的水平距离 x

$$\text{因此 } t = \frac{e^{k_1 x} - 1}{k v_0} \quad (7)$$

由于重力对子弹落点的距离:

$$h = \frac{1}{2} g t^2 \quad (8)$$

因此将击打目标高度增加 h 即可完成重力补偿。

4.4.3 算法性能

识别并击打装甲板：使用传统算法实现了装甲板及数字识别、解算和预测。识别算法精准度高，丢帧和误识别次数少且对准确识别机器人种类效果好。在对子弹飞行时间计算方面，采用弹丸受空气阻力与速度平方的相反数成正比的类斜抛运动模型进行计算，充分考虑了风阻的影响，远距离打击的精确度较高。在卡尔曼滤波方面使用了当前统计模型，可以较好的反映目标机器人的机动方式，滤波器收敛速度快。

击打能量机关：能量机关的识别、解算、预判以及大能量机关的周期判断和三角函数拟合，可以在能量机关激活点快速完成能量机关的激活。

确定击打目标：在对抗赛中，不同状态、种类目标的价值有很大的差别，本赛季制作了目标击打算法，通过数字种类、目标移动速度、是否为集火目标、是否处于小陀螺状态等因素，分别赋予不同权重设计决策函数实现选择价值最高的装甲板击打的效果。

反小陀螺：使用了快速傅立叶变换算法，算法实现了对于目标机器人是否处于小陀螺状态的判断。根据装甲板位置及运动速度和出现跳变的时刻等条件计算出小陀螺的旋转中心和云台中心的位置关系、旋转周期、旋转方向等信息，根据这些信息得出子弹飞行时间的估计值，预测出装甲板在经过子弹飞行时间后出现的位置并进行击打，这样可以在实现陀螺旋转周期内的大部分时间内都能击打且命中率较高。

通信：可以实现电脑与下位机的较高通信速率的且传输资源利用率较高的稳定通信。

4.4.4 算法结果

4.4.4.1 装甲板识别

装甲板识别使用基于检测目标特征的 OpenCV 传统方法，实现检测识别的中心思想是找出图像中所有敌方颜色灯条，并使用找出的灯条一一拟合并筛选装甲板。



(1) 图像预处理

为检测红/蓝灯条，需要进行颜色提取。颜色提取基本思路有 BGR、HSV、通道相减法。然而，前两种方法由于需要遍历所有像素点，耗时较长，因此我们选择了通道相减法进行颜色提取。其原理是在低曝光（1000 左右）情况下，蓝色灯条区域的 B 通道值要远高于 R 通道值，使用 B 通道减去 R 通道再二值化，能提取出蓝色灯条区域，反之亦然。此外，我们还对颜色提取二值图进行一次掩膜大小 3*3，形状 MORPH_ELLIPSE 的膨胀操作，用于图像降噪及灯条区域的闭合。

(2) 灯条检测

灯条检测主要是先对预处理后的二值图找轮廓（findContours），然后对初筛（面积）后的轮廓进行拟合椭圆（fitEllipse），使用得到的旋转矩形（RotatedRect）构造灯条实例（LightBar），在筛除偏移角过大的灯条后依据灯条中心从左往右排序。

(3) 装甲板匹配

分析装甲板特征可知，装甲板由两个长度相等互相平行的侧面灯条构成，因此我们对检测到的灯条进行两两匹配，通过判断两个灯条之间的位置信息：角度差大小、错位角大小、灯条长度差比率和 X,Y 方向投影差比率，从而分辨该装甲板是否为合适的装甲板

(isSuitableArmor)，然后将所有判断为合适的装甲板放入预选装甲板数组向量中。同时，为了消除“游离灯条”导致的误装甲板，专门用于检测并删除错误装甲板。

(4) 目标装甲板选取

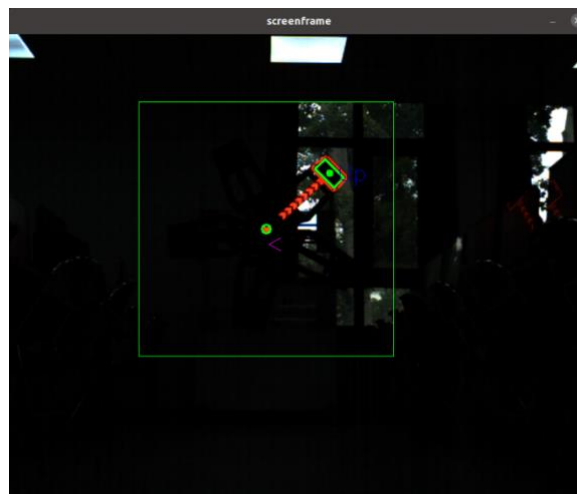
对上述各项装甲板信息（顶点中心点坐标与枪口锚点距离、面积大小）进行加权求和，从而获取最佳打击装甲板作为最终的目标装甲板。

4.4.4.2 能量机关识别

能量机关装甲板识别采用基于 OpenCV 的传统算法实现装甲板位置检测。可实现 7m 附近的准确识别，获取应击打的装甲板在图像中四个顶点、中心点以及中心 R 标中心点的坐标信息。

在 800*640 图像分辨率下，装甲板识别帧率在 100fps 左右，在没有红色光源干扰的情况下丢帧率在 1% 以下且不会发生误识别。

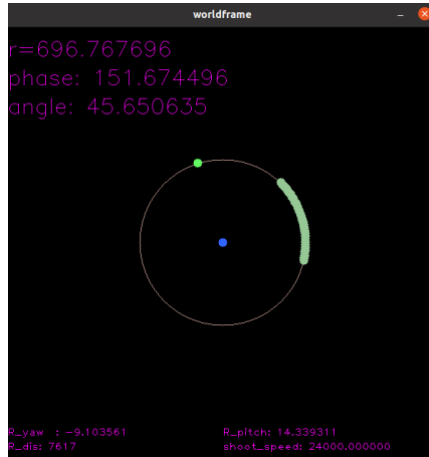
下图为在有自然光和日灯光干扰的情况下识别效果：



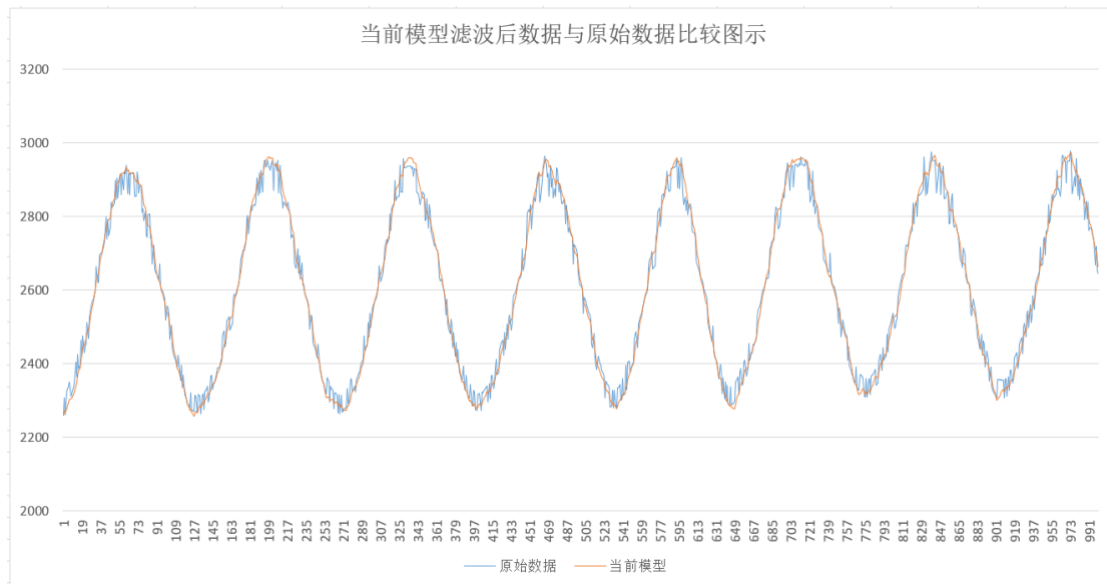
4.4.4.3 能量机关预判

能量机关预判采用了正弦函数相位拟合法，通过测量子弹飞行时间，积分后得到预判位置，最后加以重力补偿得到击打角度。

下图为将风车信息转化为世界坐标后的效果图：



4.4.4.4 当前模型滤波效果



5. 研发迭代过程

5.1 版本迭代过程记录

5.1.1 机械版本迭代

版本号或阶段	功能或性能详细说明	完成时间
V1.0	自适应底盘结构功能验证性测试	2021.10.10
V1.1	改进成为双舵轮设计	2022.2.2
V1.2	加装单枪口走线组装进行稳定性测试。	2022.3.2
V1.3	地盘上采用双舵轮提高能源使用效率，独立自适应轮组保证起伏路段稳定性。云台上主要用四点接触轴承实现 360 度旋转	2022.3.15
V2.0	采用双枪形式	2022.3.28
V2.1	底盘上采用双舵轮提高能源使用效率，独立自适应轮组保证起伏路段稳定性。云台上主要用四点接触轴承实现 360 度旋转	2022.4.10
V3.0	双枪下固定更换为微型滑轨滑块	2022.6.3
V3.1	舵轮底盘加装飞坡导轮、小陀螺导轮、关键模块保护壳、整车保护壳	2022.7.26

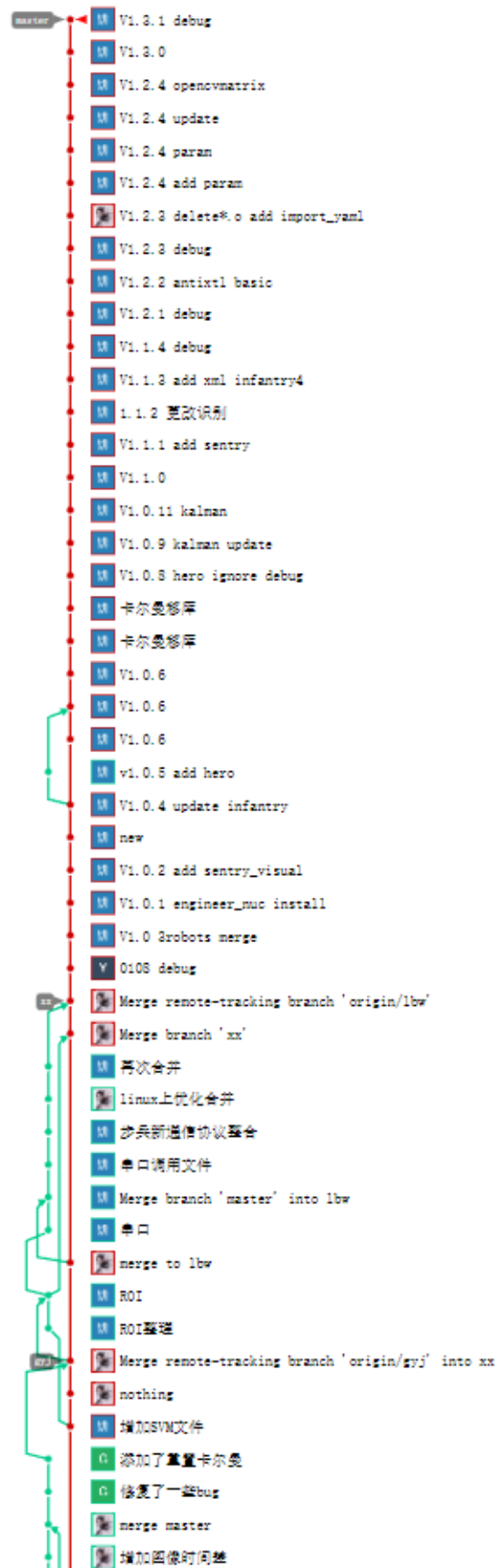
5.1.2 电控版本迭代



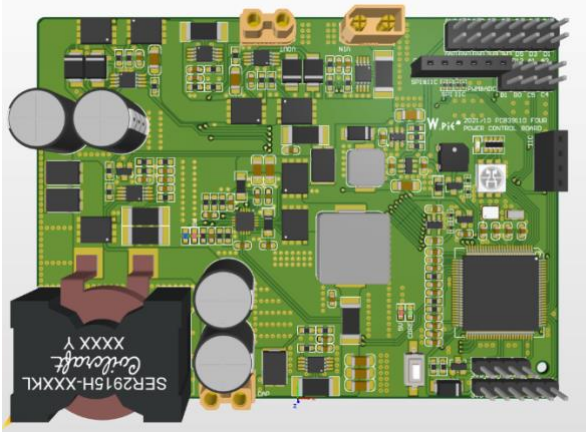
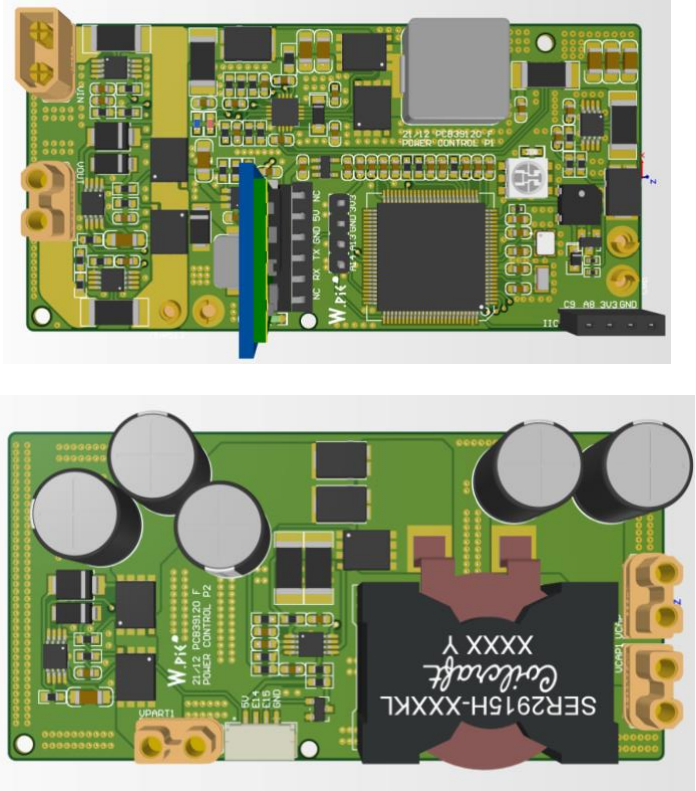


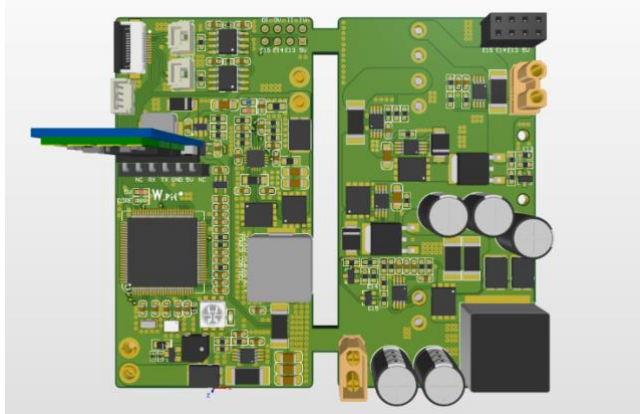
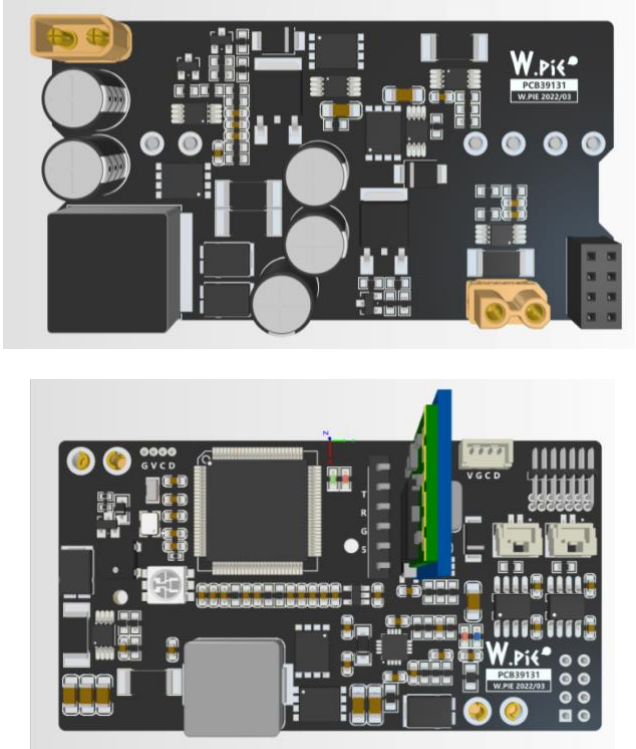

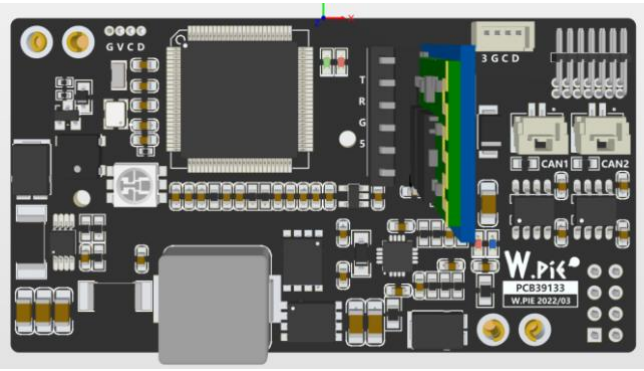
软件传承上一届步兵代码，由于新一赛季底盘由麦轮底盘更改为舵轮底盘，最开始先在单底盘上进行舵轮解算。之后组装好整车后进行整车代码的验证与改进。上图为 git 上代码迭代记录。

5.1.3 视觉版本迭代



5.1.4 电路版本迭代

版本号或阶段	功能或性能详细说明	图片
PCB39110	<p>将各个测试模块整合在一起的第一版超电，用于验证方案并学习四层板的绘制。</p>	
PCB39120	<p>为了保证升压模块的性能并更好的配合 8S 电容的布局，将超电控制板分为两部分，上板 A 板主控，下板 B 板主要是升压模块。</p>	

<p>PCB39130</p>	<p>增加 CAN 通信功能和光电门通信接口，舍弃背靠背 MOS 方案更改为 PMOS 高边电子开关+防倒灌，更改电感封装减小体积，将功率计移至 B 板。</p>	
<p>PCB39131</p>	<p>更改光电门接口封装，增加串口，增加 IIC 通信。</p>	
<p>PCB39132</p>	<p>为 39132 的两层板加急试端口版本。（只有 A 板改动）</p>	
<p>PCB39133</p>	<p>更改 CAN1CAN2 顺序和光电门接口串口顺序。终板。（只有 A 板改动）</p>	

5.2 重点问题解决记录

5.2.1 机械部分记录

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	全向轮轮组飞坡时主承重螺丝弯曲	普通螺丝的抗扭并不算好	将普通螺丝换成塞打螺丝，效果目前是没问题了	V1.0	机械工程师：李聪聪
2	全向轮轮组飞坡时推力轴承失效	平面推力轴承受力面积较小应力过于集中	换成受力面积更大的推力滚针轴承，效果不好，对轴承的损害仍很严重	V1.0	机械工程师：段一
3	在步兵对抗时产生装甲板的碰撞而掉血	对于轮组的保护未考虑到与其他步兵对抗时装甲板被撞到的可能性	进行对轮组的全包围式保护	V1.0	机械工程师：段一
4	微动开关位置改变导致枪管与发射机构不同轴	微动开关所在的黑板强度不够	改用为铝件固定微动开关	V1.0	机械工程师：付垚
5	枪管受到巨大外力时会错位	对枪管的机械限位不到位	由原本的单滑轨滑块改为双滑轨滑块上下限位	V1.1	机械工程师：付垚
6	云台在达到最大俯角时无法抬升	云台重心聚pitch支点过远导致	将双枪结构简化，减少重量且向后移动	V2.0	机械工程师：付垚
7	云台与灯条干涉	灯条与底盘与云台的关系相互克制	自制灯条支架	V3.0	机械工程师：付垚
8	飞坡翻车	没有飞坡导轮	加装飞坡导轮	V3.1	机械工程师：付垚
9	舵轮归中模块掉线	受击打后电路连接不稳定	设计整车保护壳以及个别关键零件保护壳	V3.2	机械工程师：付垚

5.2.2 硬件部分记录

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	输入不供电，但超级电容有电的时候，发现升压模块还会工作	在主控芯片被断电时没有办法对升压和输出的开关进行有效控制	增加下拉电阻确保无控制时开关关闭	PCB391 10	硬件工程师：王少珂 嵌入式软件工程师： 刘国梁
2	超电开关背靠背 MOS 模块过流能力弱，在电池供电和超级电容供电切换的时候会有短暂卡顿	暂不明确	舍弃背靠背 MOS 方案，更改为 PMOS 高边电子开关+防倒灌。更改后不再有卡顿现象	PCB391 20	硬件工程师：王少珂
3	9S 电容对于目前的超电方案充不满，不能很好的有效使用，能量利用率低还不便于安装	方案设计不合理	将超级电容改为 8S，能使用的能量更多且利于安装	PCB391 20	硬件工程师：王少珂

5.2.3 电控部分记录

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	调完舵轮 PID 后发现底盘严重超功率	PID 角度环与速度环在不同量级相互配合产生了很大输出，输出限幅过大	降低输出限幅，精调 PID，可以在效果几乎相同的情况下大幅降低功率	V1.0	软件工程师：李佳杰
2	飞坡时动力不足	驱动 PID 未给积分	可以使车在坡上停住，证明积分增大了最终输出，但是影响了底盘随动云台的效果	V2.0	软件工程师：李佳杰
3	小陀螺前进时卡顿	小陀螺的解算出现失误	参考开源方案重新进行小陀螺解算，最终能实现小陀螺下快速直线移动	V1.0	软件工程师：刘国梁
4	云台归中抖动，初始朝目标反方向移动	云台系因为改变了 C 板朝向需要重新整定	重新解算云台坐标系，最终云台运动正常	V1.0	软件工程师：刘国梁
5	云台大仰角下云台抖动严重	计算时采用陀螺的数据进行解算时失误	重新解算云台陀螺仪数据，最终云台运动正常	V1.0	软件工程师：刘国梁
6	舵轮舵向初始位置不定，导致后续运动异常	每次上电时舵向位置都不确定	使用光电门进行舵向归中	V1.0	软件工程师：刘国梁
7	舵向运动时大角度转动	舵轮方向计算需要优化	优化舵轮方向计算方法，一定程度上解决现象，但依然会出现问题	V1.0	软件工程师：刘国梁

5.2.4 视觉部分记录

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	距离解算误差大	传统识别方法受场地光照等因素影响较大，导致装甲板角点抖动明显	引入四点模型神经网络，角点识别准确	V1.0	软件工程师：李秉蔚
2	将反复左右横移以及缓慢旋转的机器人误判为小陀螺状态	仅通过装甲板位置变化的周期性进行判断	通过旋转频率进行进一步判断，有效消除了误判现象	V1.0	软件工程师：李秉蔚
3	相机标定结果与实际值差距较大	标定纸不平且有反光现象	使用电脑屏幕进行标定，效果优于使用标定纸	V1.0	软件工程师：高延钧
4	对于处于快速加速和减速状态下的机器人命中率较低	卡尔曼滤波器模型与机器人实际运动模型不符	引入卡尔曼机动模型进行滤波	V1.0	软件工程师：高延钧

6. 团队成员贡献

姓名	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%)
段一	物理学	大一	机械组成员	负责底盘部分的机械设计、整车装配等	10%
付垚	化学	大一	机械组成员	负责机器人发射机构设计、双枪管的研发等	10%
高延钧	电子信息工程	大二	视觉开发负责人	负责整体机器人的视觉技术开发，联合电控进行整车调试	10%
李秉蔚	人工智能	大二	视觉开发负责人	负责整体机器人的视觉技术开发，联合电控进行整车调试	10%
李聪聪	光电信息科学与工程	大四	顾问	负责机器人舵轮底盘的研发、把握整车机械设计方案	10%
李格	光电信息科学与工程	大三	机械开发负责人	负责整车机械设计方案设计与审核、把握整车进度、进行整车装配与维护	10%
李佳杰	物理学	大二	嵌入式组成员	负责机器人的部分嵌入式开发、各模块测试以及整车调试，配合视觉联调等	10%
刘国梁	光电信息科学与工程	大二	嵌入式开发负责人	负责整个机器人的嵌入式开发，包括底盘及云台控制、视觉系统的嵌入式环境开发等	10%
王彬羽	物理学	大二	机械组成员	负责整车机械加工、场地的设计、搭建、维护等	10%
王少珂	光电信息科学与工程	大三	硬件开发负责人	负责超级电容模块的研发、整车的电路模块设计，协同机械电控完成整车走线等	10%

7. 参考文献

- [1]. evolution 战队.Robomaster2021evolution 战队超级对抗赛技术报告[R].桂林.桂林电子科技大学机器人中心,2021
- [2]. Taurus 战队.华南农业大学 Taurus 战队舵轮单枪管步兵技术报告[R].广州.华南农业大学 Taurus 战队, 2021
- [3]. Taurus 战队.Robomaster2021 华南农业大学 Taurus 战队舵轮双枪管步兵机器人技术报告[R].广州.华南农业大学 Taurus 战队, 2021
- [4]. 华南虎战队.第二十届全国大学生机器人大赛 ROBOMASTER2021 华南虎舵轮步兵机器人设计报告[R].广州.华南理工大学机器人实验室, 2021
- [5]. RobotPilots 战队.Robomaster2021 超级对抗赛及高校单项赛深圳大学 RobotPilots 技术报告[R].深圳. 深圳大学 RobotPilots, 2021:1-10
- [6]. 机动目标模型研究与发展综述[J] 潘平俊,冯新喜,赵晓明.指挥控制与仿真 . 2006 (03)
- [7]. 基于“当前”统计模型的容积卡尔曼滤波算法[J]. 张彪,薛俊杰,杨自豪,王涛,徐光辉. 现代雷达. 2022(02)
- [8]. 2018 年香港科技大学超级电容开源方案
- [9]. 【航电】麦轮, 舵轮, 全向轮底盘解算开源
- [10].深圳大学 RoboPilots 战队一双枪舵轮步兵电控开源
- [11]. “RM2021+华南理工大学+普渡华南虎+机械设计开源+舵轮步兵机器人” 开源资料
- [12]. “(杭电) 麦轮、舵轮、全向轮底盘解算开源” 开源资料
- [13].福建工程学院定妆照
- [14].西交利物浦大学双枪口步兵机器人技术报告
- [15].RM2021Taurus 舵轮双枪技术报告
- [16].RM2022 东部赛区决赛视频
- [17].RM2022 中部赛区决赛视频
- [18].RM2022 南部赛区决赛视频

W.PiE



微信公众号&站：WPIE学生创新实验室