

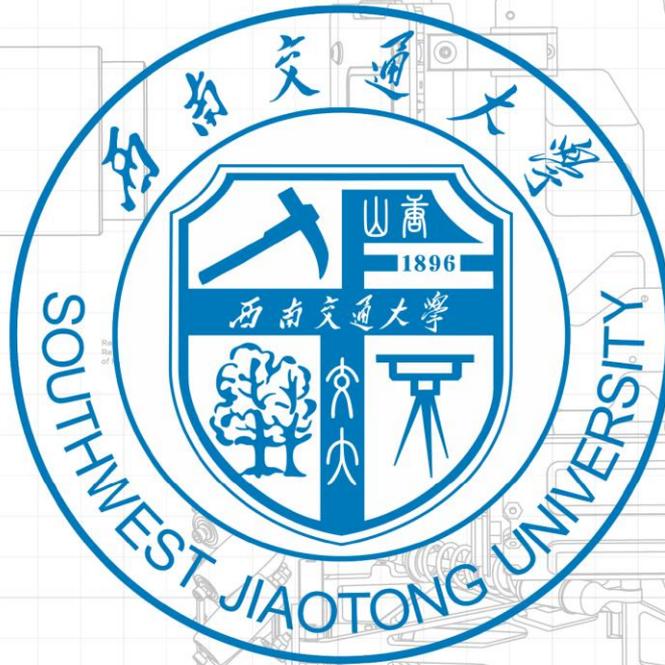
V1.0

Using a 32-bit motor driver chip and Field-Oriented Control (FOC), the RoboMaster C620 Brushless DC Motor Speed Controller enables precise control over motor torque.

HELIOS

机甲大师
ROBOMASTER

Exclusively designed for the RoboMaster M3508 P19 Brushless DC Gear Motor and C620 Brushless DC Motor Speed Controller, this M3508 Accessories Kit includes several cables and a terminal board.



ROBOMASTER 2022 超级对抗赛

西南交通大学技术方案

西南交通大学 编制
2022年04月 更新

目录

1. 步兵机器人功能定义	4
1.1 云台设计	4
1.2 武器系统	5
1.3 麦轮步兵底盘设计	5
2. 麦轮步兵核心参数	6
3. 设计方案	7
3.1 机械结构设计	7
3.1.1 云台设计	7
3.1.2 武器系统设计	14
3.1.3 麦轮步兵底盘设计	19
4. 参考文献	34
4.1 机械部分参考文献	34

摘要

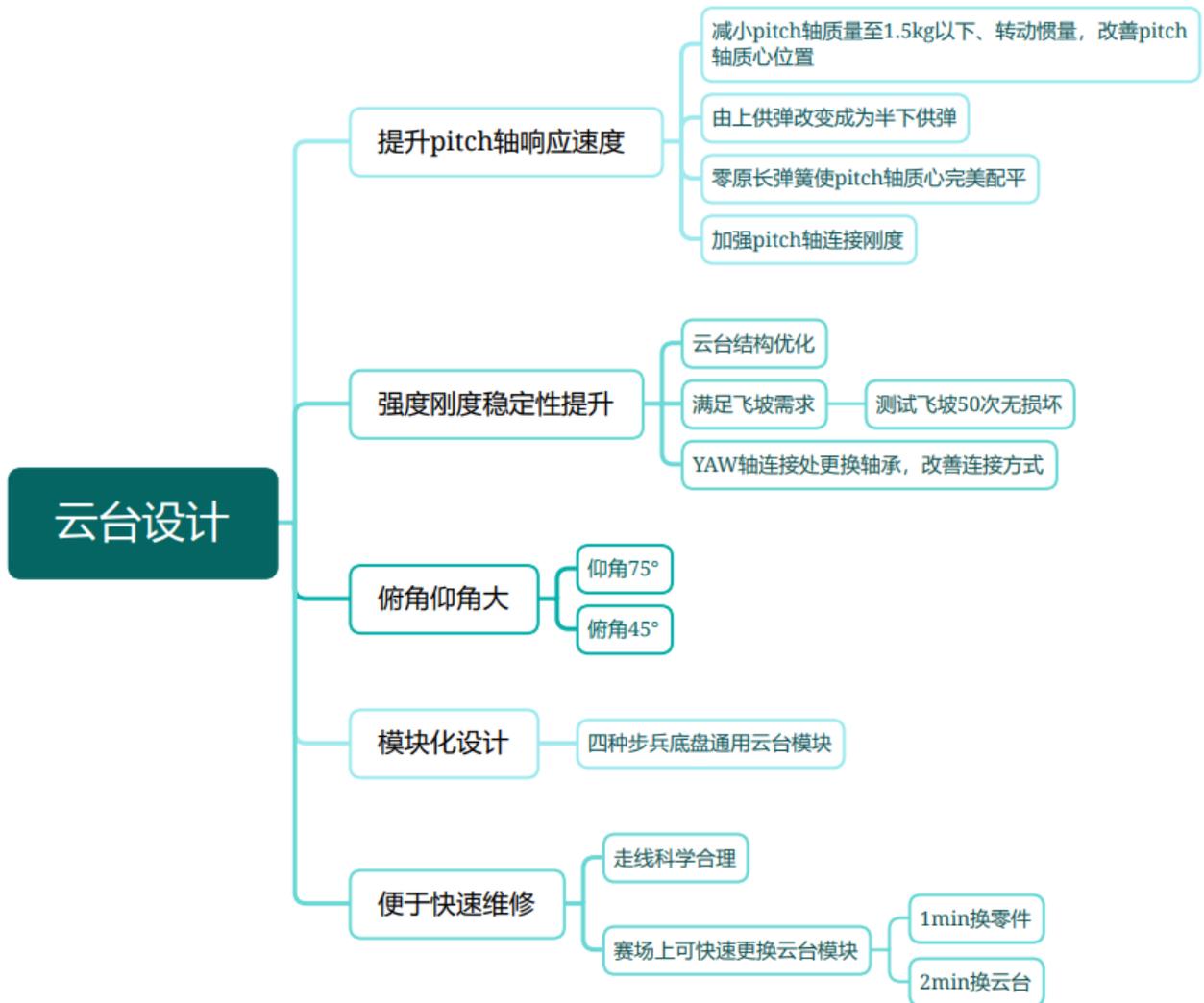
步兵机器人作为 Robomaster 赛场上地面输出的主力兵种，具有重要的战略地位。优秀的步兵机器人能带动全场的进攻节奏，拿下重要资源点，执行精密的战术配合，是决定比赛的胜负手。故我队本赛季着重步兵机器人的技术研发，以下为西南交通大学 Helios 战队步兵机器人技术方案报告。

1. 步兵机器人功能定义

针对本队自身情况，以及 RM2022 赛季规则和场地的变化，我队决定以麦轮步兵底盘为研发主体，平衡步兵底盘与舵轮步兵底盘作为后期研发对象，暂时不考虑自动步兵的研发。

由于本队云台为模块化设计，四种步兵底盘可共同使用，只需在比赛之前选择适合战术所需的底盘。所以本队步兵机器人功能定义分为以下三部分：（1）云台设计（2）武器系统（3）麦轮步兵底盘

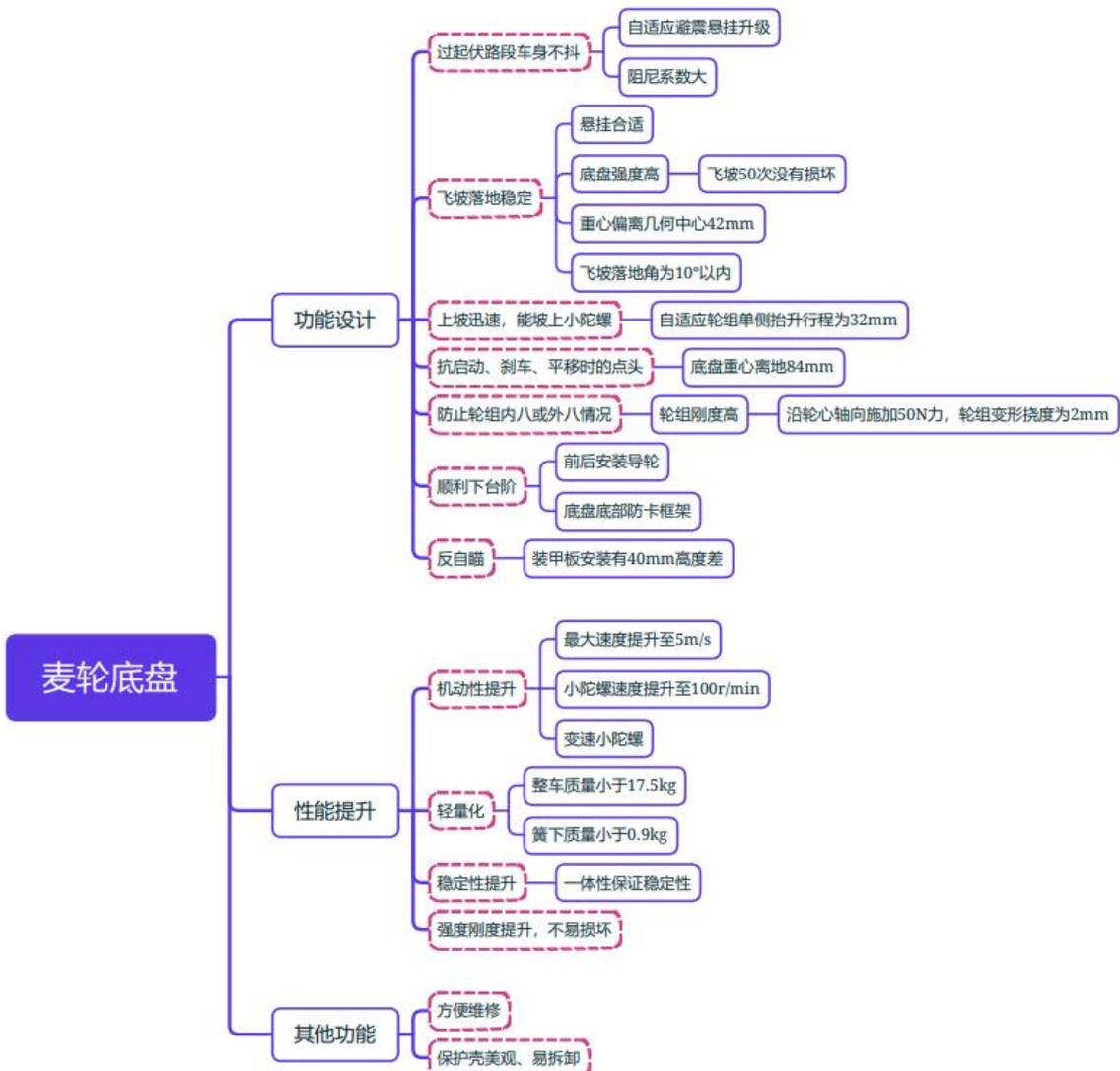
1.1 云台设计



1.2 武器系统



1.3 麦轮步兵底盘设计



2. 麦轮步兵核心参数

麦轮步兵核心参数			
机械部分			
尺寸(长宽高)	590mm*490mm*450mm	前进最大速度	4.62m/s
底盘重心离地高度	82mm	平移最大速度	4.41m/s
整车重心离地高度	140mm	最大小陀螺速度	96.6r/min
重心偏离中心距离	42mm	最大爬坡角度	30°
底盘离地高度	75mm	平均爬坡功率	55W
防撞框离地高度	99mm	避震角	87°
pitch轴离地高度	410mm	飞坡落地接近角	10°
前后轮间距	381mm	启动加速度	0.45G
左右轮间距	354mm	极速制动距离	55mm
整车质量	17.40kg	避震行程	25mm
底盘质量	12.80kg	自适应连杆行程	32mm
云台质量	4.60kg	麦轮传动减速比	15.88
簧下质量 (单个轮组)	0.831kg	最高射速	29.9m/s
簧上质量	14.076kg	云台仰角	75°
避震规格	1.5mm*16mm*60mm	云台俯角	45°
启动最大车身倾斜角	2.5°	有效攻击范围最小半径	48mm
云台自由度	2	YAW轴活动范围	360°

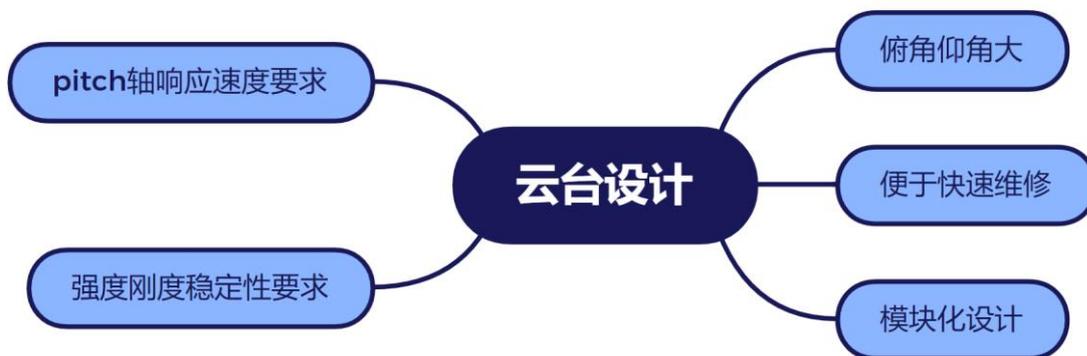
3. 设计方案

3.1 机械结构设计

3.1.1 云台设计

- 需求分析

步兵是地面输出的主力兵种，需要完成精确打符、飞坡阻截和战场追击等作战任务，这对步兵的云台提出很大的性能要求。



3.1.1.1 步兵云台的模块化设计

本赛季我队因步兵底盘多样，考虑到能够保证云台的通用性，对步兵云台进行了模块化设计，即云台与不同底盘的连接处通用。将云台与底盘独立有以下好处：

- (1) 云台与底盘可分开设计，多人协作，互不干涉，加快机械画图效率。
- (2) 使维修性提升，当云台某底层零件受损时，可直接更换其他车的云台。
- (3) 减少零件种类，减少变形设计，兼容性强，可控制水平高。

3.1.1.2 Pitch 轴响应速度提升

Pitch 轴的响应速度通俗来讲就是常说的云台“跟不跟手”。Pitch 轴的响应速度直接影响了能否精确打符、近距离战斗时的灵活性以及一些操作的上限。影响 pitch 轴响应速度的因素主要有 pitch 轴质量过大、转动惯量过大、质心位置不在几何中心等。目前解决此问题的方式主要是通过改变供弹方式。传统的上供弹弹仓与 pitch 轴固连，导致 pitch 轴质量、转动惯量过大，且 pitch 轴质心位置会随弹丸的数量而改变，会对电控的调节带来极大困难。下供弹和半下供弹的供弹方式都能缓解上述出现问题。

本队今年选择半下供弹的结构作为云台的主体结构。半下供弹即把弹仓固连在 YAW 上，

减小 pitch 轴整体质量与最大转动惯量，防止弹丸数量对 pitch 轴质心的影响。相比与半下供弹，下供弹可以使 YAW 轴的转动惯量减小，但是下供弹的链路过长，使供弹链路的阻力更大；需要使用特制滑环，增加研发成本。

半下供弹虽然增加了 YAW 轴的转动惯量，但我们通过视觉主机与弹仓质量配平，使得质心仍保持在几何中心；同时链路长度适中，不会增加拨弹的阻力。

本队今年半下供弹研发遇到的主要问题在于：由于 pitch 轴采用 GM6020 电机驱动，弹丸必须从侧面进入预制，导致 pitch 轴的质心无法配平，导致电机发热严重。

对此，我队首先提出的解决办法为：把 GM6020 电机远离轴心，使用平行四边形连杆驱动 pitch 轴角度转动（图-2）。此方案使质心刚好位于 pitch 轴上方（图-1），解决了质心偏

移的问题。但根据转动惯量的公式 $I = \sum_i m_i r_i^2$ 可得此方案由于 GM6020 安装的摇臂距离 pitch 转轴距离过大，导致其转动惯量较大，重心过高，响应仍然具有提升空间；且此四连杆机构具有死点位置（图-3）。

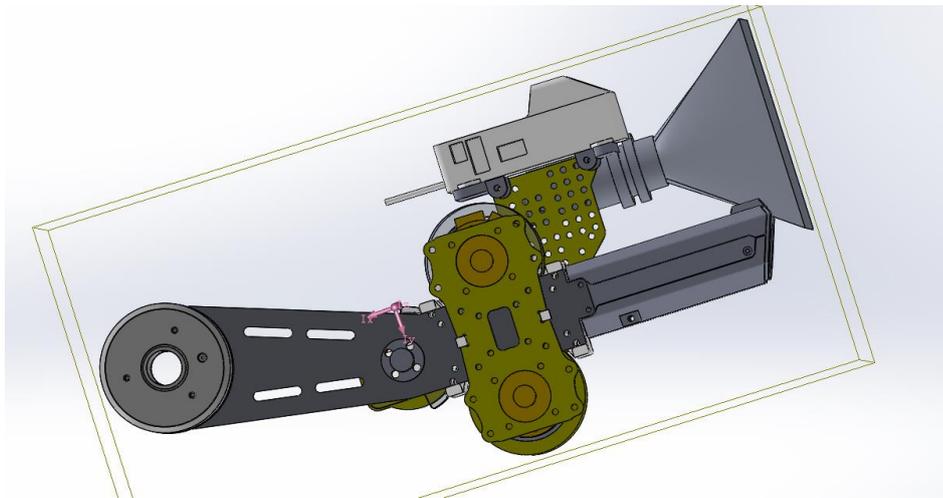


图-1 pitch 轴配平方案



图-2 四连杆驱动 pitch 轴转动方案

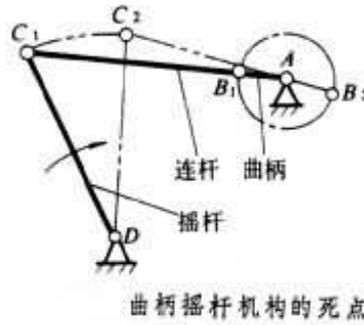


图-3 四连杆死点示意图

所以我队舍弃了四连杆机构，转而提出第二套解决方案：利用零原长弹簧对 pitch 轴的质心配平。在这里感谢广东工业大学-DynamicX 机器人队开源的完美平衡重力补偿方案。结合零原长弹簧的机械结构的理论开源，我队第二版云台实现了利用零原长弹簧（图-4、图-5）对 pitch 轴的质心配平，以下是计算过程：

PITCH 轴总质量：1.6kg

力臂长度：73mm

零原长弹簧总长：125mm

伸长量 L：73mm

两段弹簧行程为 H1=32mm，H2=44mm

根据计算公式

$$k = \frac{MgL}{H_1 \times H_2}$$

代入数据得

模具弹簧的劲度系数 k=0.829N/mm

使用零原长弹簧配平 pitch 轴质心之后，相比第一版四连杆方案云台：在云台质量更小的情况下，第一版本云台 pitch 轴总长度为 L1,总质量为 m1,对 pitch 轴中心转动惯量为

$$I_1 = \frac{m_1 l_1^2}{12}$$

第二版云台 pitch 轴总长度为 L2,总质量为 m2,对 pitch 轴中心的转动惯量为

$$I_2 = \frac{m_2 l_2^2}{3} = \frac{m_2 (\frac{l_1}{2})^2}{3} < \frac{\frac{m_1}{2} \times l_1^2}{12} = \frac{m_1 l_1^2}{24}。$$

可以看出，零原长方案下云台的转动惯量更小，云台的响应速度更快，解决了电机发热严重的问题。

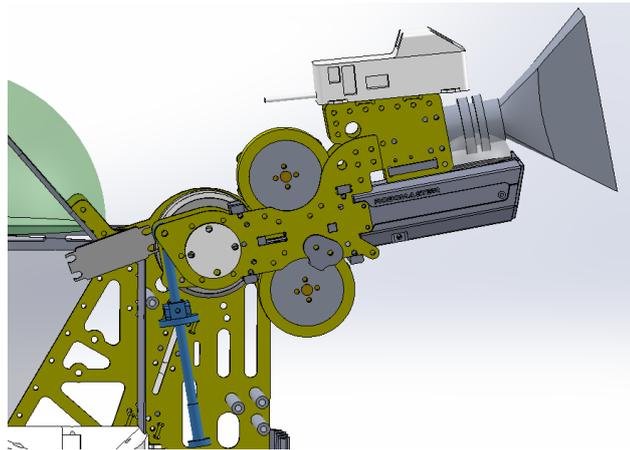


图-4 零原长弹簧设计图

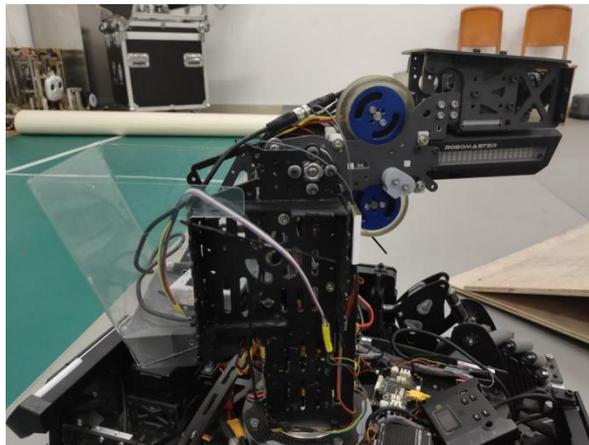


图-5 零原长弹簧配平效果

3.1.1.3 云台强度、刚度与稳定性提升

云台的强度刚度主要分为云台的整体强度，YAW 轴连接处的强度与 pitch 轴处的连接强度。如果云台的强度不足，可能出现下台阶后或飞坡落地后断头的情况。对此，我们对云台的 YAW 轴、pitch 轴连接处以及云台整体结构进行了重新设计。

首先 YAW 处连接（图-6）处舍弃之前让电机螺丝受剪的方案，设计打印件抱紧 GM6020 电机，避免电机安装的螺丝受剪；底盘设计有一个机加工件，与打印件外径过盈配合，减小了 YAW 处的挠度，提升整体刚度；同时云台受冲击时的弯截面积增大，使云台 YAW

轴连接处的极惯性矩增大，优化其抗弯性能。GM6020 上方法兰盘与深沟球轴承内径紧密配合，碳板和打印件夹紧轴承上下表面，使连接处受力的一体性更优秀；同时利用 GM6020 定位凸台传力，进一步避免了螺丝受剪力，优化了 YAW 轴连接处的整体强度与刚度。

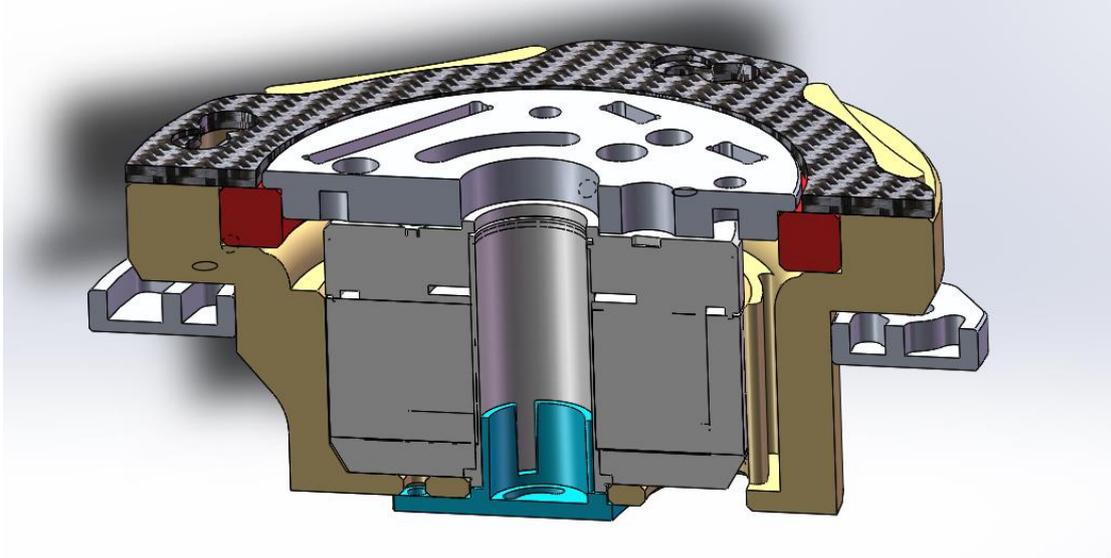


图-6 Yaw 轴链接设计

Pitch 轴连接处使用 GM6020 直接连接，对侧为阻尼片：减小了 pitch 轴的虚位，同时加强了结构的强度；转轴阻力减小，可以给 pitch 轴施加预应力，以此提升 pitch 轴的刚度。

云台整体为碳板榫卯结构，截面形状为空心方管。根据

$$\sigma = \frac{My}{I_z}$$

而又因为截面惯性矩（ $I = \text{截面面积} \times \text{截面轴向长度的二次方}$ ）为截面各微元面积与各微元至截面某一指定轴线距离二次方乘积的积分

$$I_z = \int y^2 dA$$

在截面积一定的情况下，形心轴离 z 轴越远，根据平行移轴定理：

$$I_z = I_{zc} + y^2 A$$

其截面惯性矩越大，抗弯性能也越好，飞坡落地时抗冲击能力就越强。同时通过在单接处打特种环氧树脂，即普通环氧树脂与气相二氧化硅反应后得到的混合物（图-7），这种环氧树脂的粘性与韧性极高，使云台结构一体性更强，加强了云台整体强度、刚度与稳定性。



图-7 环氧树脂与气相二氧化硅混合物

3.1.1.4 云台俯仰角设计

由于 RMUC2022 的比赛场地地形复杂，步兵需要在各种地形下具有攻击敌方机器人装甲板的功能，这就需要步兵的云台保证有较大的攻击范围。譬如在能量机关激活点可以攻击到地面上的敌方机器人，需要较大的俯角；在资源岛附近能攻击到环形高低上方的敌方机器人，需要较大的仰角。环形高低的边缘坡度为 115° ，最高离地距离为 765mm ，当我方机器人贴近环形高地时，若拥有 65° 以上仰角即可在近距离击打敌方机器人； 40° 以上俯角即可从上而下攻击敌方。

为此我队利用竖置摩擦轮布局优势，设计云台最大仰角为 75° （机械限位为 78° ）（图-8），设计云台最大俯角为 45° （机械限位为 48° ）（图-9）。相比上赛季步兵机器人，仰角增大 30° ，俯角增大 15° ，攻击范围增加 60% 。

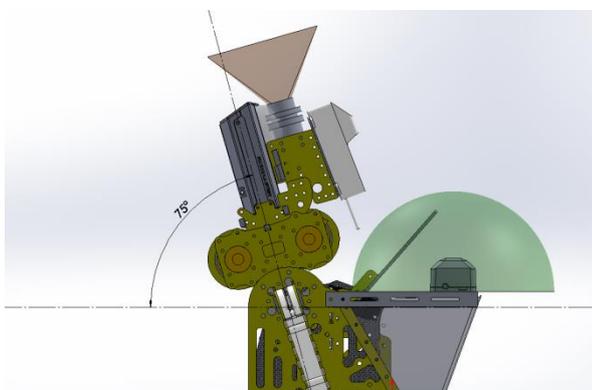


图-8 云台仰角示意图

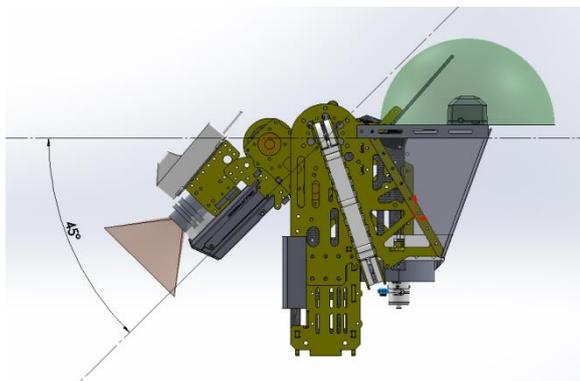


图-9 云台俯角示意图

3.1.1.5 可快速维修

结合往年比赛经验，赛场上若有零件损坏，能在短暂的暂停时间内快速修复机器人，无疑是一项很重要的能力。而从根本上提升快速维修的办法是设计“快拆”结构。针对此想法，我队本赛季对云台与底盘的连接处设计了“快拆”机构（图-12）。

“快拆”机构在使用时仅需拧松四根塞打螺栓（图-10）以及拔插快拆插头即可完成整个云台的拆卸，整个过程时间控制在 30s 左右。

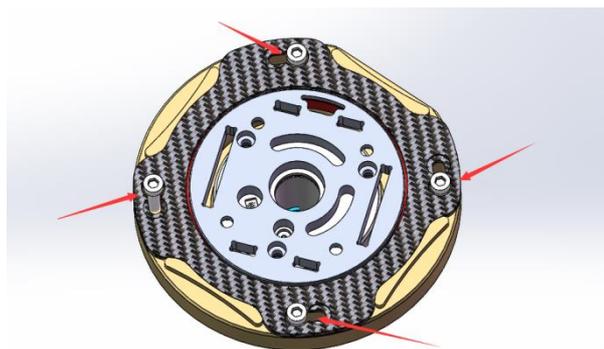


图-10 快拆结构安装孔位

为了实现“快拆”云台，首先 GM6020 要反向安装，即转子固定，定子旋转。YAW 轴 GM6020 的 can 线与电源线随云台一起转动。滑环下方设计一集成快拆插头，同时底盘有设计一集成快拆插头（图-11）。

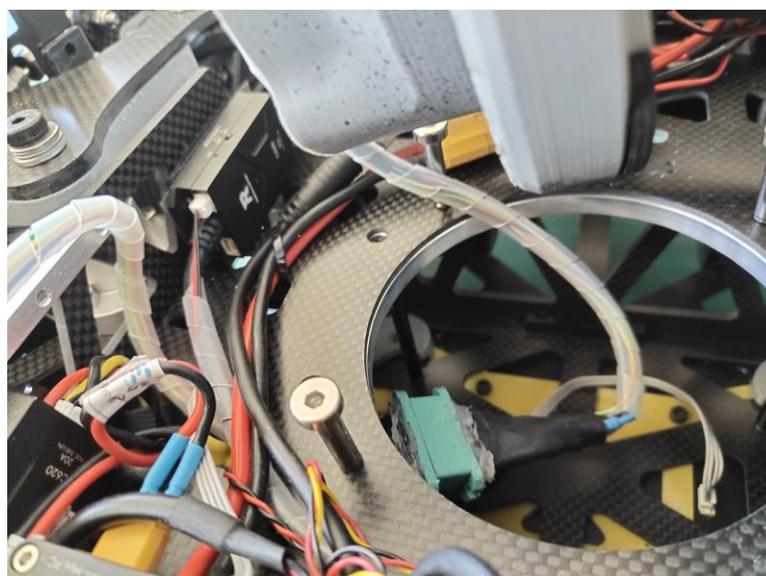


图-11 快拆插头

安装时首先连接云台与底盘的集成插头，然后使“快拆”上卡扣大孔对齐拧于底盘上的四根塞打螺栓，把云台放入底盘中，旋转“快拆”构件，使塞打螺栓进入卡扣小孔，拧紧塞打螺栓，使背头沉入碳板铣槽中。整体云台靠塞打螺栓固定，且用摩擦力增加云台与底盘连

接强度，在能快速拆卸云台的同时，也保证强度不会受到影响。

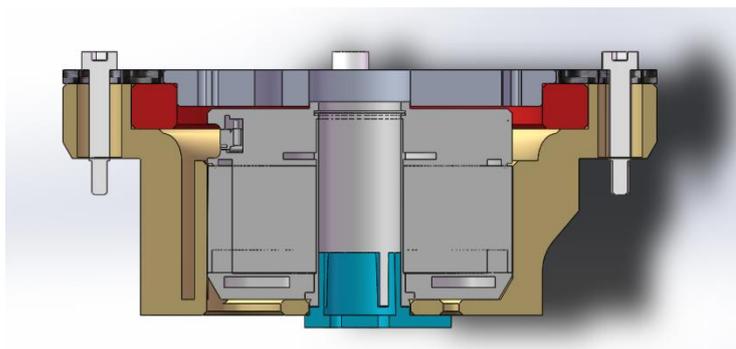


图-12 快拆结构剖面图

3.1.2 武器系统设计

需求分析

武器系统是决定对战双方实力强弱的直接因素，强大稳定的武器系统可以为队伍提供稳定的火力输出，是左右战场局势的胜负手。因此，研发步兵 17mm 武器系统并保证其稳定性的重要性不言而喻。



针对以上四点需求，我对 17mm 弹丸的预制、供弹链路以及拨盘的机械结构进行创新设计。

3.1.2.1 步兵 17mm 弹丸拨弹机构

本赛季之前，我队使用的拨弹机构为十二齿拨盘（图-13），其主要问题有以下几点：（1）卡弹率高（2）2006 电机与拨齿连接处虚位大，甚至发生断裂（3）拨弹盘体积过大，影响云台空间布局（4）空弹率较高等。

针对以上出现的问题，我队首先对需要解决的问题的优先级进行排序：（1）解决 2006 连轴虚位以及结构强度问题/解决卡弹问题（2）解决体积过大问题（3）解决空弹问题。

毫无疑问，一个稳定好用的拨盘最基本的要求是不会出现虚位且结构不会损坏。因此，
我队首先对 2006 电机与拨叉的连接方式进行优化。

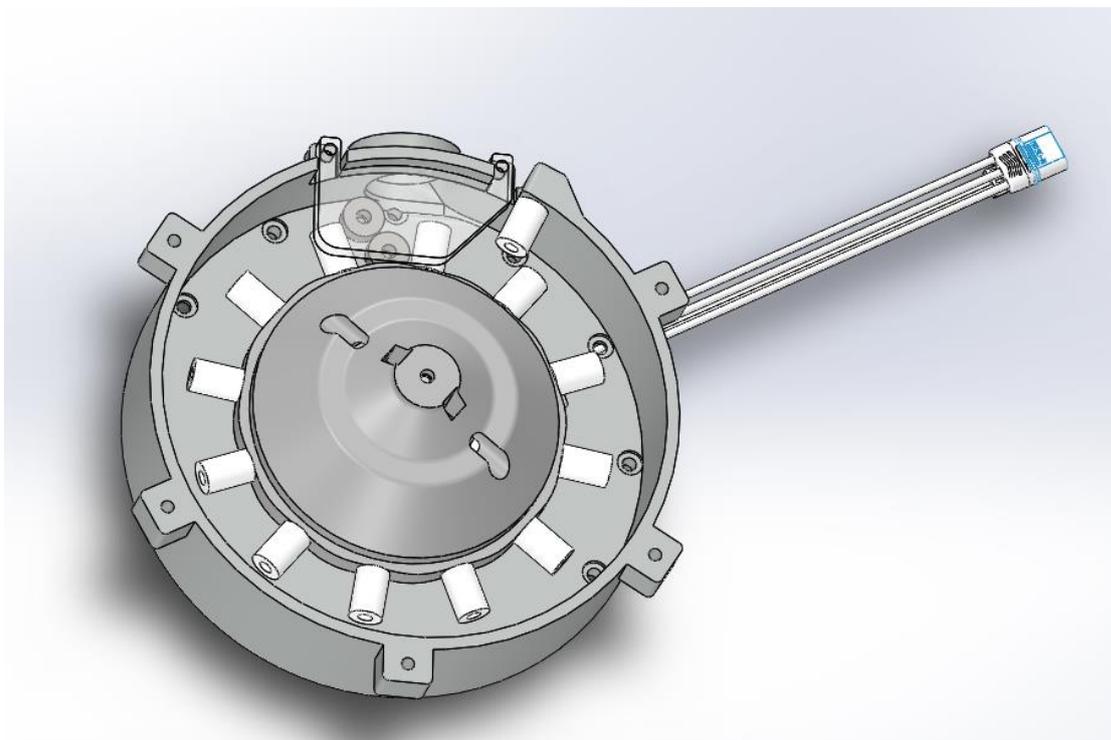


图-13 十二齿拨弹机构

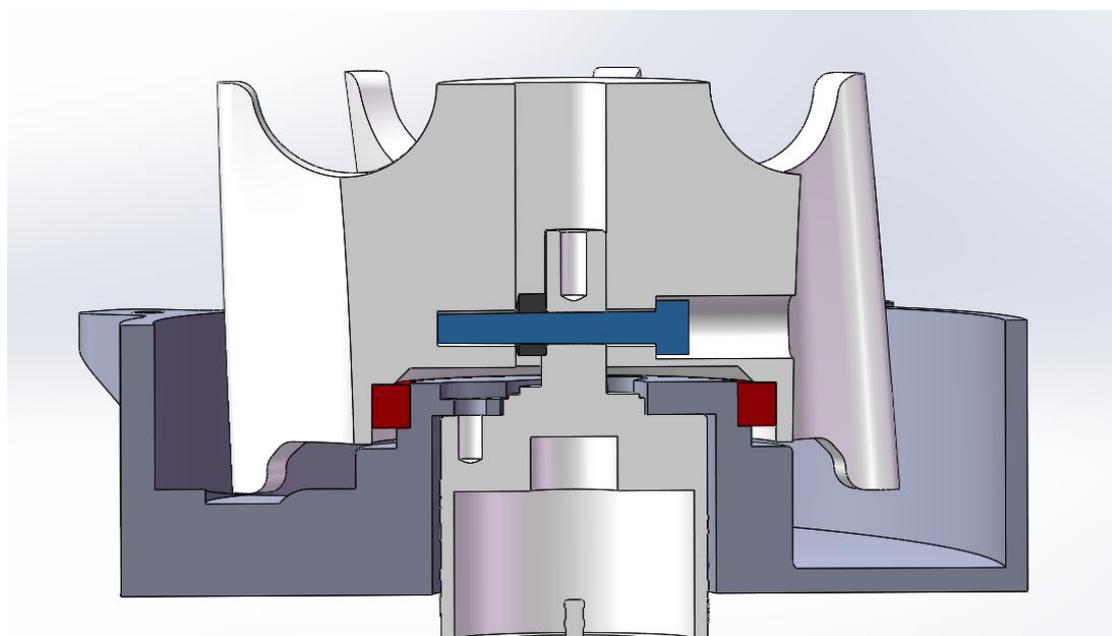


图-14 新赛季拨盘剖面图

以往，我们使用螺栓直接通过 2006 电机输出轴，通过打印件“D 型孔”抱紧，但此连接方式由于打印件硬度较低，使用时间长后，会出现明显虚位，导致连接处强度下降，甚至断裂。对此，我们设计一种新型连接方式（图-14）：利用方形螺母（图中黑色零件）把 2006 输出

轴和拨叉夹紧，利用摩擦力自锁，这样极大的减小了 2006 电机输出轴与拨叉的连接虚位，加强了连接处的结构强度。同时，在拨叉的下方设计有一深沟球轴承（图中红色零件），其外径与拨叉过盈配合，内径与拨盘紧密配合，由于圆形截面对其形心轴的惯性矩为

$$I_{zc} = \frac{\pi d^4}{64}$$

横截面积由 2006 输出轴截面增加为深沟球轴承横截面，连接处的抗弯性能

大大加强，使结构强度进一步加强。

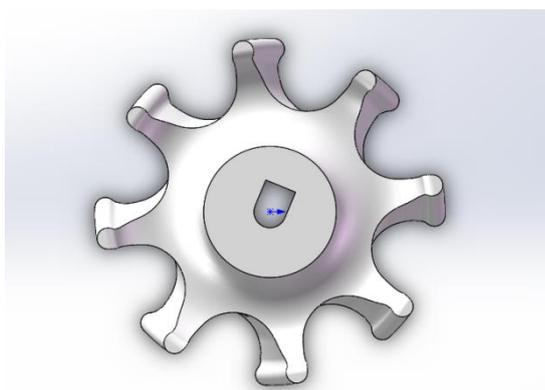


图-15 拨叉外形

我队还对拨叉的形状进行重新设计（图-15），使拨弹时弹丸速度与拨叉间锐角角度增大，进一步优化了拨弹时拨叉的受力情况。拨盘的卡弹问题现在仍然是阻碍步兵能进行稳定火力输出的最大问题。上赛季我队的拨盘卡弹率约为 5%，水平位于联盟中下。

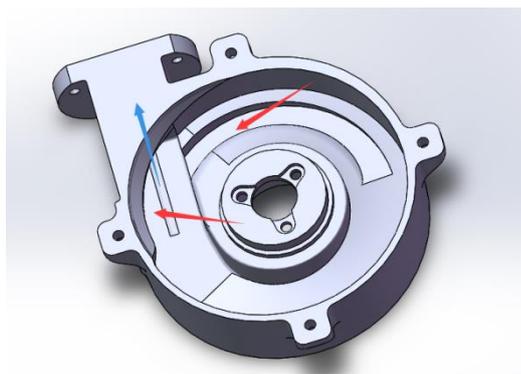


图-16 拨弹盘防卡单设计

拨盘卡弹主要由于弹丸在拨盘出口处会发生错位或与侧壁锁死。针对此问题，本赛季我们着重对拨弹盘进行重新设计（图-16）。首先，在拨弹盘底部增加斜坡（图中红色箭头），减小拨弹时阻力，使拨弹过程更加顺滑；重新设计弹丸从拨盘拨出时与拨叉间角度，使弹丸线速度与拨叉转动时的线速度重合（图中蓝色箭头），大大减小弹丸与侧壁锁死的概率；在拨弹盘弹丸出弹口新增挡片（图中红色箭头），使第二层弹丸不会在出弹口与下层弹丸出现

挤压，同时为倒转拨叉提供空间，进一步降低卡弹概率；同时拨叉建模为螺旋线切除，拨弹时弹丸运动曲线更加平滑，同时降低了卡弹率与空弹率。我队 22 赛季拨盘，经过多次测试，在高射频与低射频状态下，卡弹率均保持在 2‰以下。

当拨弹盘体积过大时，会严重影响云台布局，增加云台质量，影响云台的响应速度。对此我队将原本 12 齿拨盘改为 8 齿拨盘，同时拨叉与拨盘布局更加紧凑，优化了云台 pitch 轴与 YAW 轴的布局，为云台增大俯仰角度提供空间。

此外，降低空弹率也是优化拨盘的趋势。针对传统单层拨盘空弹率高的状况，我们加高拨叉厚度，在任何情况下保证每个位置始终有至少两颗弹丸；在拨叉上方增加离心柱，拨叉转动时，能够充分搅动弹仓中弹丸，增加弹丸进入拨叉概率，大大的减小了空弹概率，经测试空弹率保持在 3‰以下。

3.1.2.2 供弹链路的设计与优化

上赛季我队步兵采用上供弹，链路设计要求较低；本赛季步兵机器人改为半下供弹设计，供弹链路增长，因此优化供弹链路，减小弹链阻力迫在眉睫。

我队以往的长供弹链路通常采用光滑直管配合圆弧弯管使用，但弹链阻力任然较大。针对此问题，本赛季我们创新使用样条曲线作为链路主体（图-17）。样条曲线是经过一系列给定点的光滑曲线，其不仅通过各有序型值点，并且在各型值点处的一阶和二阶导数连续，就是说该曲线具有连续的、曲率变化均匀的特点。样条曲线的优势还在于可以在卡弹最严重的链路段加大其供弹链路曲率半径，来达到解决某一段严重卡弹的问题。

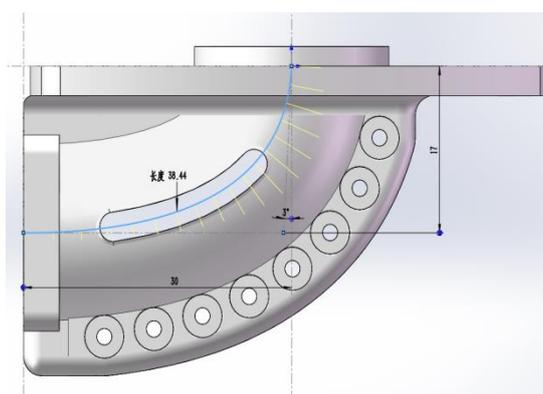


图-17 样条曲线供弹链路

此外，我们通过测试发现，在转轴位置增加一段平直导管，可以有效减少弹丸在转轴处的卡顿。在曲率较大处，为了防止弹丸与侧壁挤压发生自锁，我们设计通过轴承减小弹丸经过弯管时的摩擦力。

由于 17mm 小弹丸的外径存在公差，传统的光滑内壁会导致小弹丸在链路中发生错位，增大阻力。所以我们在内壁增加四根的定心轨道（图-18），确保任何时间 17mm 小弹丸都可以被其中三根轨道确定位置，避免了弹丸因错位而产生的摩擦力。

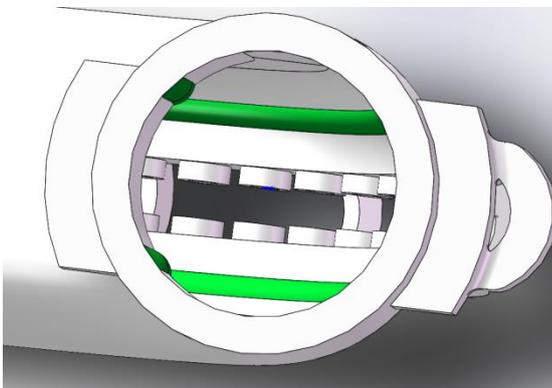


图-18 供弹链路定心轨道设计

此外，在直线管道，我们放弃了光固化的打印工艺，使用玻纤板结合 PC 板组合作为链路（图-19），这样不仅强度更高，而且可以随时观察弹链内弹丸运动情况。外观更加美观优雅，具有设计美感。

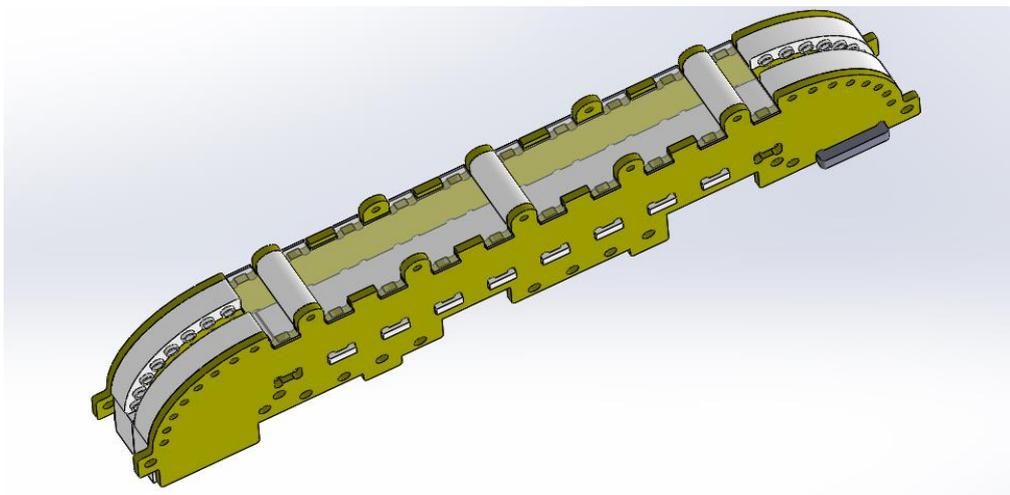


图-19 透明供弹链路

3.1.2.3 竖置摩擦轮预制

上赛季我队采用水平放置摩擦轮的发射方法，由于本赛季云台结构重新设计，我们最终决定使用竖置摩擦轮预制方案。

竖置摩擦轮预制方案有以下几点优势：（1）俯仰角度更大（2）减小 pitch 轴间距，增强 pitch 轴刚度。

竖置摩擦轮布局的预制优化了云台布局，使 pitch 轴俯仰角大幅度提升，活动范围为 75°

至 -45° 。

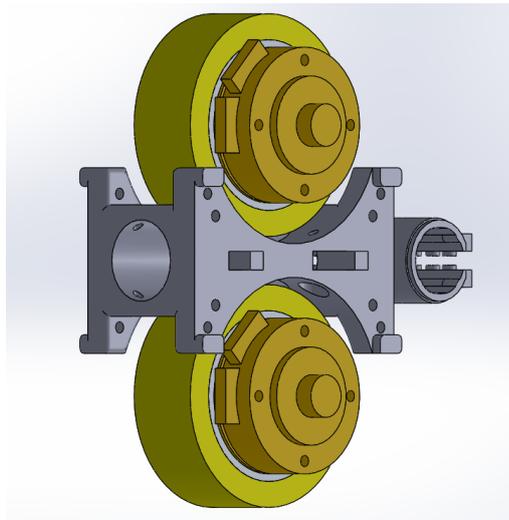


图-21 竖直摩擦轮预制模型

预制我们采用左右各放置一个 U 型轴承的方案。利用 U 型轴承形变量小的特点，我们可以保证预制的精确度，保证发射的精确度。

3.1.3 麦轮步兵底盘设计

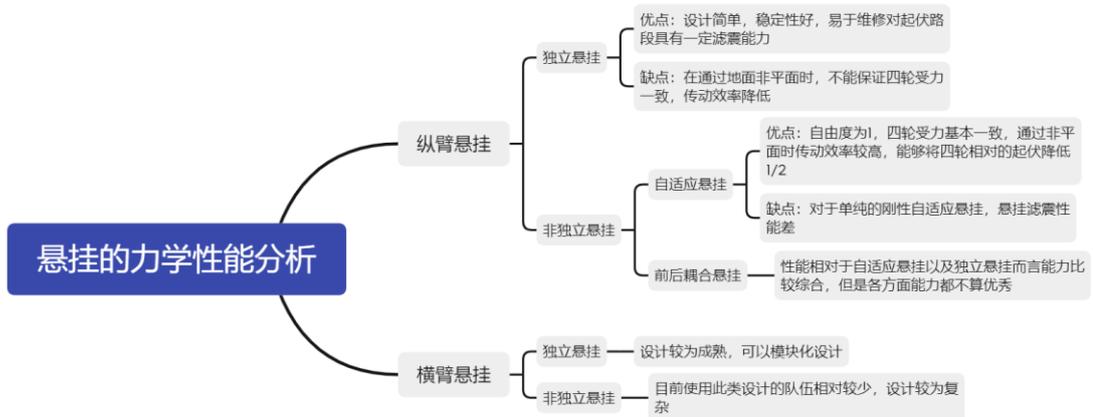
3.1.3.1 具有避震效果的自适应悬挂设计

需求分析：

分析本赛季规则，场地加大了起伏路段的面积，同时保留了上赛季的飞坡增益。步兵在过起伏路段的云台稳定性，爬坡效率，飞坡机械稳定性，将会很大程度影响步兵在对抗过程中所能发挥的作用，所以悬挂对过起伏路段的滤震性，爬坡、过起伏路段效率，飞坡缓震性能、飞坡姿态，减小机器人加减速时的惯性“点头”，将会是本赛季我们对步兵设计的着重方向。

现有方案分析

现有悬挂设计中，悬挂设计大致分为如下几类：



基于以上分析，我队将会基于自适应原理，同时在设计中加入弹簧进行滤震。

方案设计：

我们的方案确定为在轮组到自适应之前添加一个自由度，由弹簧连接，使刚性悬挂增加弹簧避震。

悬挂尺寸确定如下，由二维草图（图-22）表示：

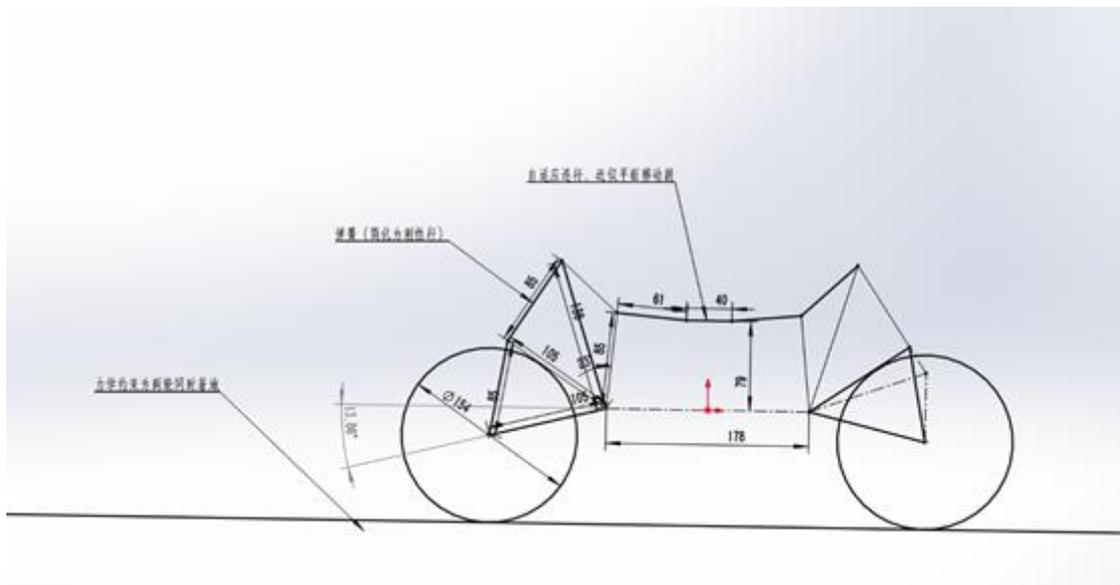


图-22 悬挂线框图

对静止与地面的底盘进行受力分析如下：

①自适应悬挂对于车身的自由度为 1，即确定一个轮子的位置之后，其余轮子的位置就

被唯一确定了，具体为对角轮组离车身距离相同，同侧轮组距离车身距离和为定值。

②自适应悬挂的平衡条件为四轮同时着地。

③当假设机器人重心位于正中间，四轮静定时，四轮距离质心的距离基本相同（由于摆臂转动副引起的轮组离质心距离变化量相对于总体尺寸而言很小，可以忽略）， $d_1=d_2=d_3=d_4$

对于质心求矩 $\sum M_i=0$ 即 $-F_1d_1+F_2d_2-F_3d_3+F_4d_4=0$

对于同侧： $F_1=F_2, F_3=F_4$

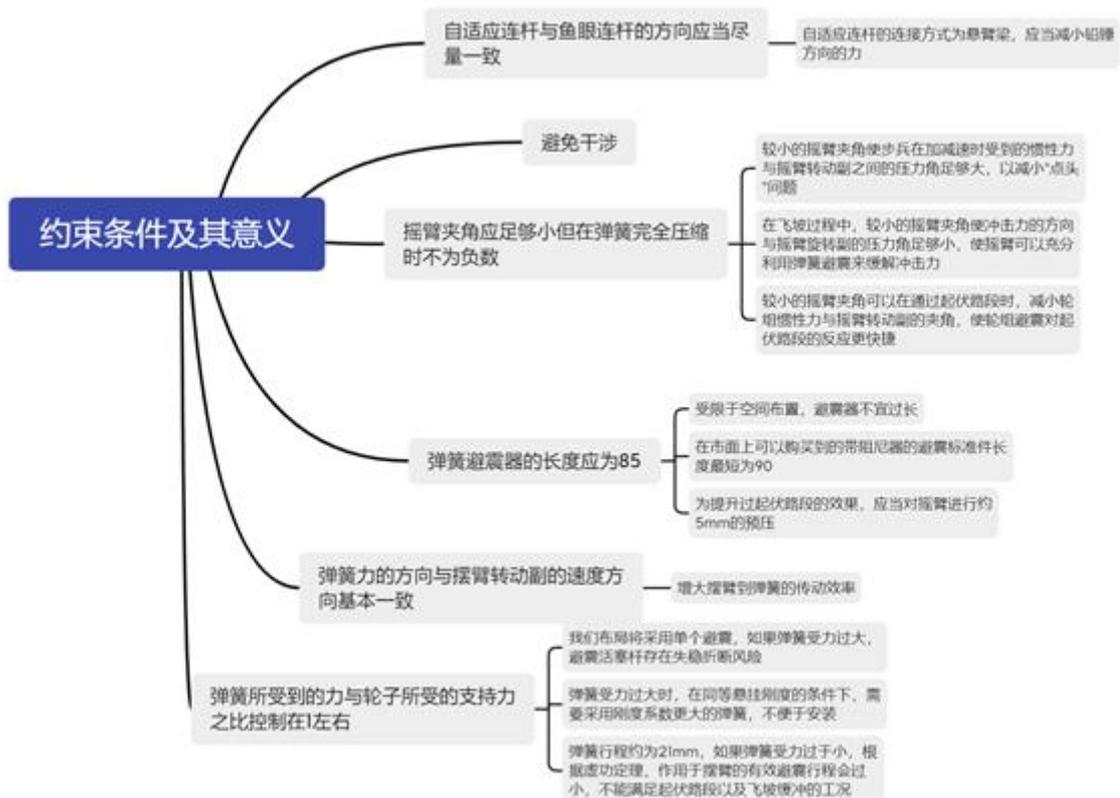
解得： $F_1=F_2=F_3=F_4$

对 z 轴方向求力平衡： $\sum F_z=0$, 即 $F_1+F_2+F_3+F_4-P=0$

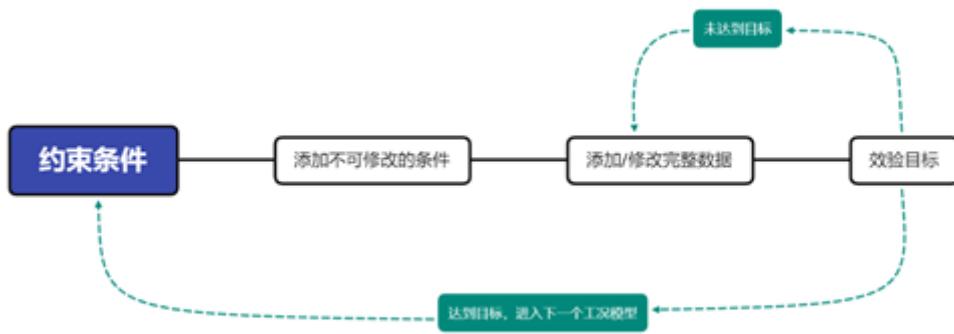
最终得： $F_1=F_2=F_3=F_4=\frac{P}{4}$

④，完成空间整体受力分析之后，对模型进行一定的简化，将受力情况简化为二维模型，对单侧自适应连杆进行静力学分析(由于悬挂左右受力情况对称故可以只分析一边)使用 solid works 草图功能辅助我们快速确定参数：

关于参数确定的约束条件，主要包括以下几点：



⑤在初步完成参数的确定后，将会根据前文中提到的约束条件进行效验具体流程如下：



注：关于上面草图中确定的悬挂参数，在实际设计过程中是针对平面静定分析，非平面静定分析，飞坡受冲击力受力分析，过起伏路段动力学分析而综合确定的参数，在这里为了避免赘述参数确定过程，直接在草图中展示了最终的参数数据，该数据会在后面的几种工况分析中被直接引用。

⑥不同工况下的悬挂受力以及运动情况

- 四轮同时位于一个水平面时（图-23）：

此情况包括步兵放置于地面时，或是步兵被水平举起后被释放，自由落体砸向地面。

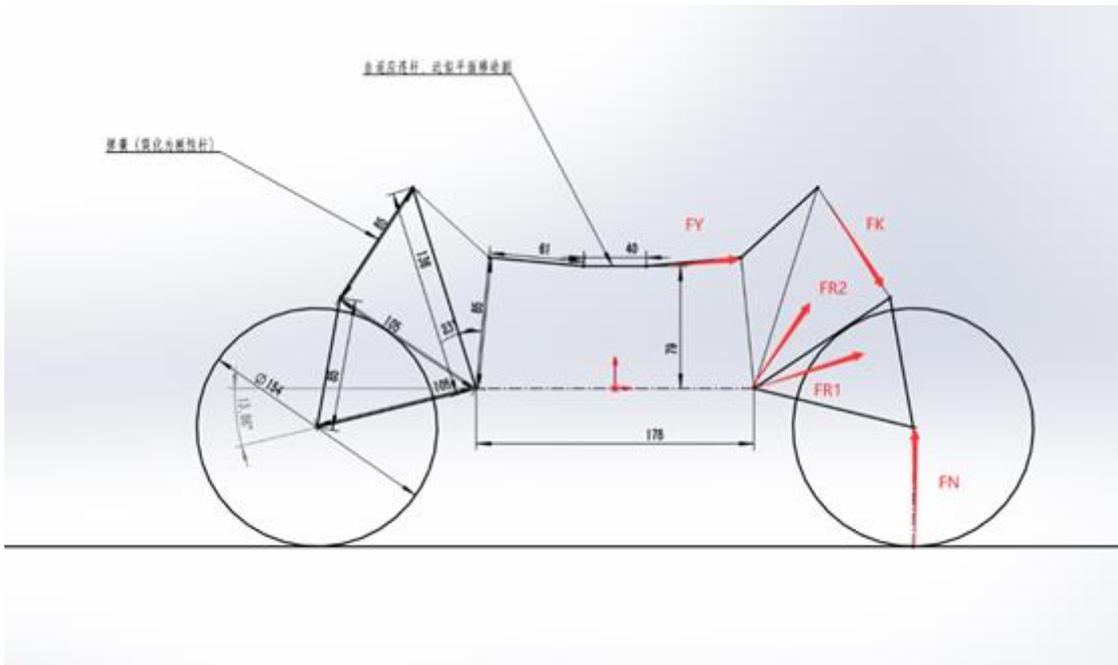


图-23 四轮共面线框图

计算过程：弹簧避震可简化为二力杆，麦轮所受力垂直地面方向，过圆心向上。根据三力汇交定理，可求得摆臂转点受力方向，根据平面汇交力系平衡的几何条件可求得三力大小关系

$$F_K=0.97F_N$$

$$F_{R1}=0.56F_N$$

同理可得

$$F_Y=1.20F_N$$

$$F_{R2}=1.14F_N$$

主要受力部件分析如下图

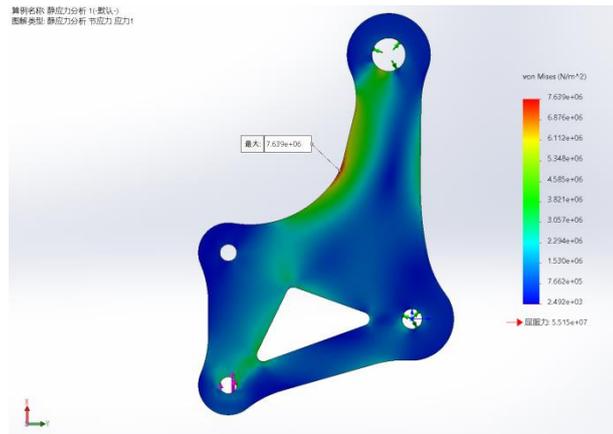


图-24 自适应连接件受力分析

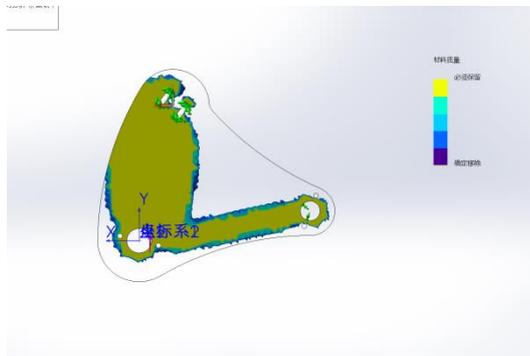


图-25 轮组摆臂拓扑分析

即在受力中加入轮组和底盘由运动所产生的惯性力

对于悬挂轮组：

轮子受到的惯性力大小为：

$$F_{\Pi} = \frac{v^2}{R} m_1$$

其中， v 为底盘的移动速度， m_1 为簧下质量， R 为轮心轨迹半径，比赛过程中，当通过起伏路段时

R 的变化相对较小，根据公式可知，而机器人的移动速度对惯性力大小有更大的影响。当机器人过起伏路段速度过快，轮组运动所产生的惯性力会增大，由于自适应的存在，四个轮组最后作用在簧上的力大小不变且相等，所以当惯性力增大后，地面对于麦轮的支持力会减小，弹簧避震所产生的力将变大，所以当惯性力达到一定程度后，不仅会减小轮组对于地面的抓地力，甚至会出现麦轮飞离地面的情况。

故降低簧下质量将会很好的提高过起伏路段的极速，为实现这一效果，本队采用了同步带驱动以及模块化碳板麦轮以及悬臂拓扑优化减重的设计方案，

最终得到簧下质量：831.2g。（单一轮组轮组质量）

对比一般麦轮驱动方式，我们减重了 50%

理论上，这会提高起伏路段极速 30%

以下是新型麦轮步兵与独立悬挂步兵极速对比数据：

(1) 缓震方面：当步兵连续通过起伏路段，我们可以认为整个系统发生规律的振动：

对于悬挂的振动模型（图-28），我们可以将其简化为如下图：

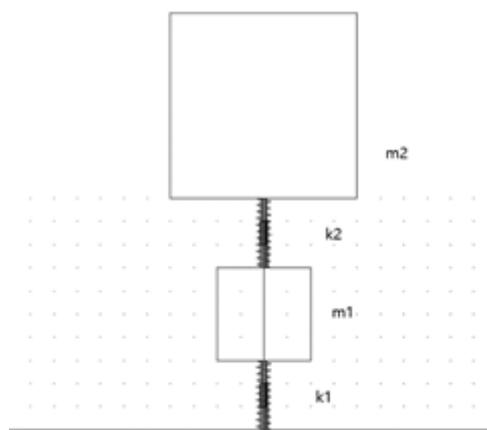


图-28 悬挂振动模型

即一个两自由度的受迫振动模型。对于受力情况，可以简化为簧下受到规律的变化力：

$$F=H\sin\omega t$$

而簧上簧下质量的运动方程为

$$\text{簧下: } m_1 a_1 = -k_1 x_1 + k_2 (x_2 - x_1) + H \sin \omega t$$

$$\text{簧上: } m_2 a_2 = -k_2 (x_2 - x_1)$$

由此解得的簧上质量的振幅为

$$\frac{HK_2}{(k_1+k_2-\omega^2 m_1)(k_2-\omega^2 m_2)-k_2^2}$$

由此可知，当机器人总质量不变的情况下，簧下质量越轻，簧上振动越小。

对于簧上：由于自适应的存在，四个轮子构成一个空间四边形，对角点的高差为所过起伏的高度，而底盘位置位于对角线中点，故在单个轮子通过起伏时，簧上同时发生向上以及旋转。

根据达朗贝尔原理，相当于受到与运动相反方向的力，对质心求力矩平衡方程，可知，被抬起来的轮子受到的力增大，此时弹簧发生压缩，进一步保证了簧上的稳定性，云台视野抖动减小，以下是起伏路段小陀螺 pitch 抖动角度（图-29）：控制在 $\pm 0.75^\circ$

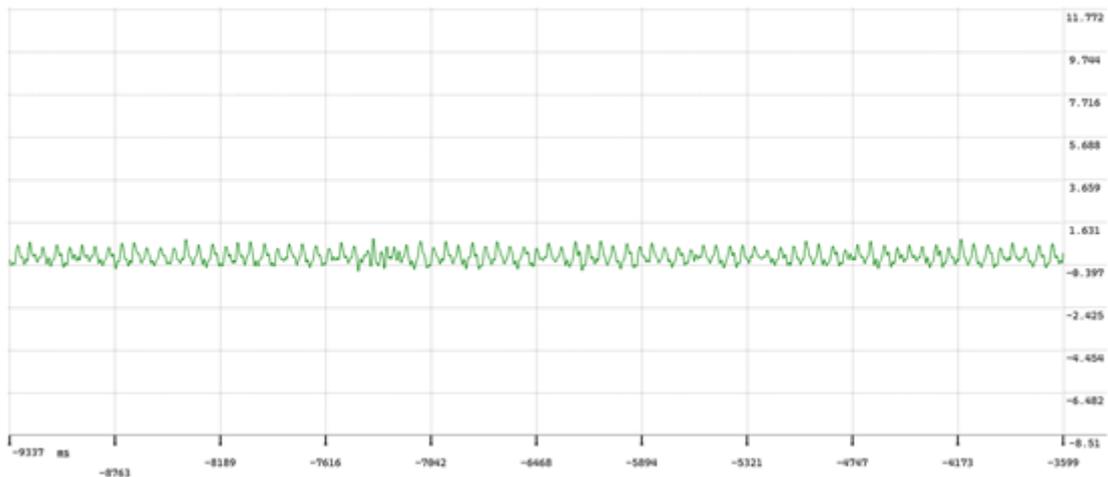


图-29 麦轮步兵起伏路段小陀螺 pitch 轴抖动角度

(2) 在方案设计中，我队采用了较小的摇臂夹角的设计，主要有以下两点考虑

- 当通过起伏时

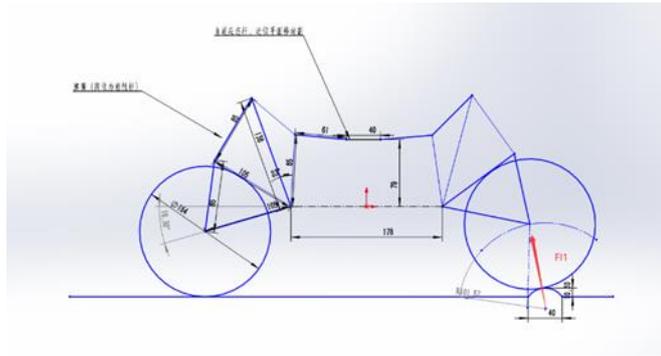


图-30 车身通过起伏路段时线框图

由上面的受力分析可知，悬挂轮组受到的惯性力基本指向垂直上方，当悬挂的摇臂角足够小时，轮组的运动轨迹也基本上保持在垂直方向上，即力与运动方向的压力角足够小，受到的惯性力直接传递到避震上，悬挂避震对路面起伏的反应更加灵敏。

- 当发生侧向加减速时

此时的麦轮运动受力分解如下图-31

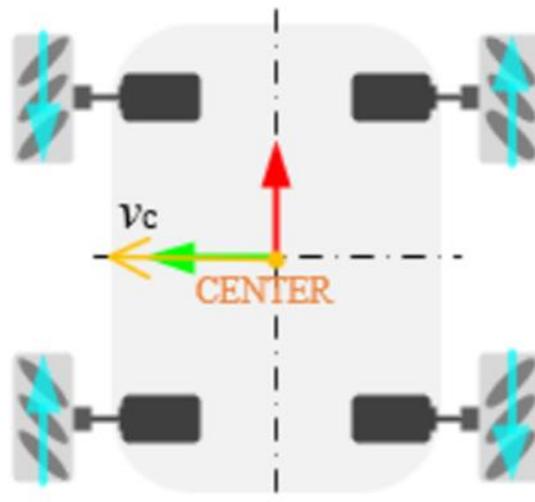


图-31 麦轮受力分解图

由此可知：左右麦轮分别受到相对（图-32）和相背的分力（图-33）

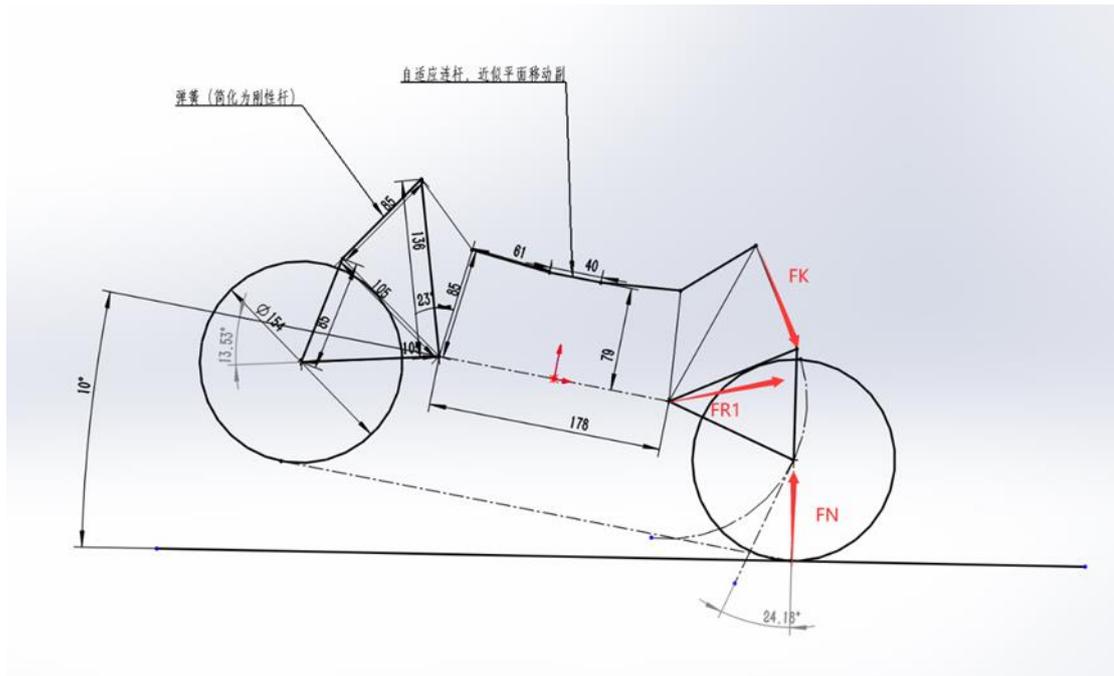


图-34 飞坡落地时车身线框图

在我们优化了摆臂角之后，此时，前轮受到的力与摆臂转动副的压力角仅为为 24.15° 。此时，摆臂转点受到 0.4 倍地面冲击力，弹簧受到 0.9 倍地面冲击力。如果摆臂角过大，弹簧受到的力会不断减小，地面带来的冲击力被直接传递到摆臂转点上，弹簧所起到的缓冲作用被削弱，车身整体更多受到冲击力，长此以往，会对机器人结构产生影响。

3.1.3.2 同步带驱动麦轮设计

传动方面，上文中我们已经提到，我们的麦克纳姆轮驱动方式为同步带驱动，对比直驱：

已知

3508 电机转速最高 9000 转/分，减速比 1 比 19.8；电机直连转速 454 转/分，轮子直径 152mm；

计算轮子周长 0.48m，再根据麦克纳姆轮的速度分解，计算得到车速最大 3.63m/s。其实略低于要求。当采用加速比为 20 比 16 后，车速能够达到 4.6m/s。

计算起步加速度，根据 3508 电机峰值扭矩 5Nm。轮子半径 76mm，估算时暂时忽略轮子转动惯量的影响，得到起步加速度 16m/s^2 ，明显起步加速度过剩了，实际达不到这么大的起步加速度，轮子会打滑，所以选用一个 20 比 16 的减速比，这样最大速度 4.6m/s 起步加速度 12.8m/s^2 较上一组更为合理。

但以上数据只能作为初步估算，实际情况不管是最大速度还是起步加速度均达不到要求的数值。实际更精确的计算，需要引入更复杂的数学模型，例如把 3508 电机的转速转矩曲线输入电脑，精确计算起步 0.5s（示例）内平均的起步加速度。同时，我队的同步轮驱动方案

还可以在后续中，对应实际的工况对减速比进行调节，最终取得最佳加速比。

3.1.3.3 底盘框架设计

本赛季我队采用了无铝方管，全碳板壳体结构采用此设计的理由如下：

空间布局更加合理：如果采用铝方管结构，要达到较好的强度质量比，就要选择较为粗的铝方管，但是这样的结构设计，必然会导致铝方管占用太多的空间，且铝方管为直线，布局的自由度不高，可塑性不强，而采用全底盘碳板拼接，碳板的位置布置自由度更高，且碳板均采用 2mm 或 3mm 厚度，占用空间较小，对整体布局影响较小。

- 受力连续性更好：

传统铝方管框架铝方管与铝方管之间的传力途径为两个铝方管之间的面接触与摩擦力以及螺丝的拉力与螺丝切力，当螺丝受切时，螺丝易被失效，铝方管之间易发生扭转晃动，使整体底盘出现受力危险点，底盘的整体刚性下降等一系列问题。而采用碳拼接底盘，底盘的受力情况可简化为一个受弯的梁，即上下底盘主要发生拉伸压缩变形，而中间添加到肋板以及铝柱抗切，主要也受拉伸压缩形变，由碳纤维复合材料的特性可知，碳纤维在纤维方向上的抗拉压能力非常强，强度甚至高于结构钢，所以这样的整体框架的强度刚度是很高的，同时，主要的受力的零件数量变少了，主要是底盘壳体的外围碳板，以及内部的支撑板受力情况清晰，易于分析简化。同时，在框架上添加别的模块时，可以利用之前对整体主要受力分析的结果，在受到较小的限制的条件下，任意设计。并且，碳板与碳板间通过榫卯连接，在装配完成后进行了上胶补强，螺丝只负责定位与拉紧碳板，碳板的受力面积变大，受力的方式可设计，整个底盘的受力是连续的，由于受力的面积变大，同等受力条件下，应力更小。

- 受力的可设计性强：

由于我们采用的是碳板拼接，碳板的形状可以是任意的，它的工艺性优于铝方管，并且各碳板的厚度可是按需选择的，并且碳板的拼接角度可以按需设计，可以使车身整体不是一个简单的方形，而是按需设计，由于这样的高自由度设计，我们可以在保证强度一定的情况下，降低底盘的质量，达到很高的强度刚度比。同时，由于可设计性强，在完成对底盘的受力分析之后，我们可以按照底盘的受力情况去添加零件，对薄弱地方进行补强。

最终我们的底盘设计结构如下图：

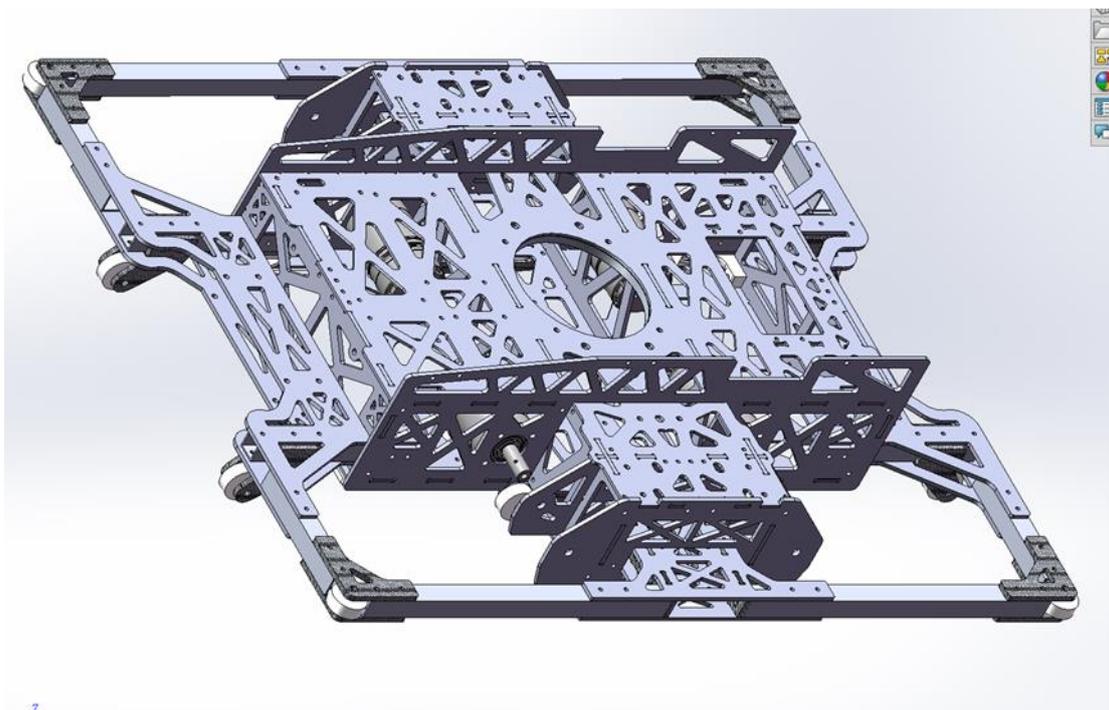


图-35 底盘结构框架

整体结构为壳式结构，这样设计的优点有：

对于任意截面（图-36）

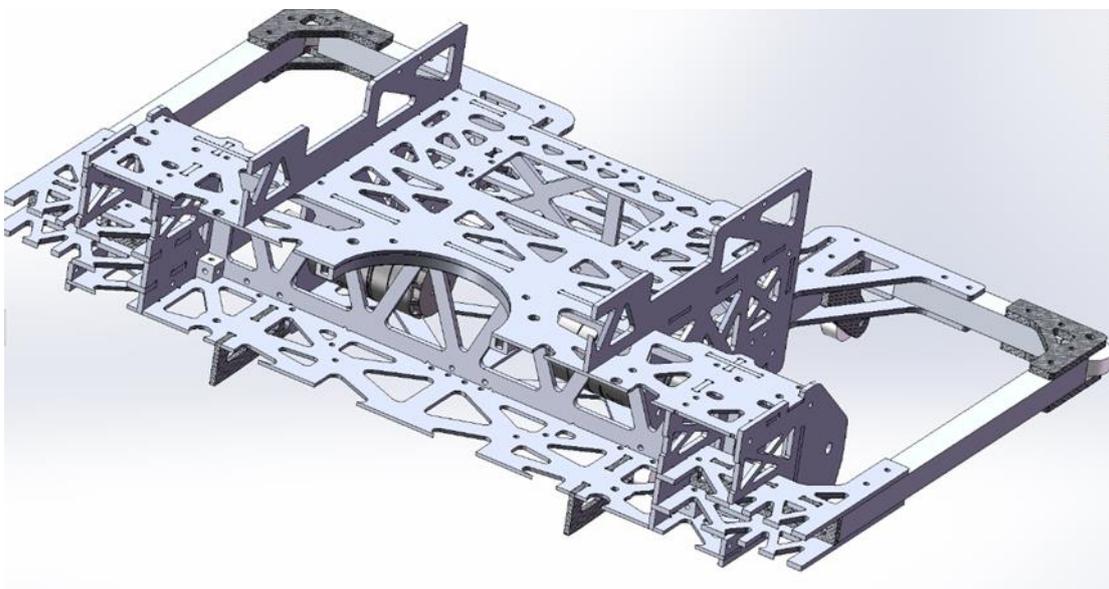


图-36 任意截面几何质量分布于边缘

此时截面的质量都分布在几何体的边缘，根据极惯性矩公式：

$$I_p = \int_A \rho^2 dA$$

此时的极惯性矩等质量下最大，对底盘整体的抗扭抗弯强度刚度有明显提升。同时，面对壳

体结构在开口处有强度下降的问题，我们在开口处添加了加强板或者是铝柱（图-37），对此处的强度进行补强，在质量增加不大的情况下避免了危险点的出现。

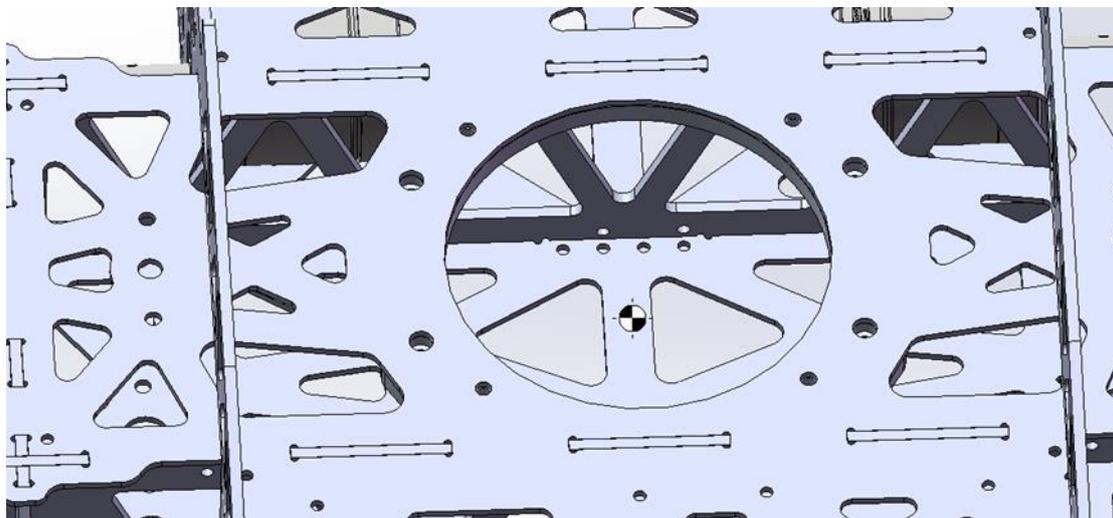


图-37 强度补强

3.1.3.4 下台阶防卡设计

由于步兵机器人在赛场上需要频繁的上下台阶，以往的比赛中有不少步兵机器人被台阶边沿卡死，导致其丧失行动能力。针对此问题，我队通过在步兵底盘增加4*13*5轴承密集排布以及聚氨酯导轮加装在一段圆弧形挡板（图-38）上，保证步兵机器人在任何速度流畅下坡而不卡死。

此外我们还在前后装甲板下方的位置，增加两对导轮（图-39），其目的为在步兵飞坡失速时，改变飞坡落地的接近角，防止避震到达自锁角度，避免步兵机器人无缓冲落地而造成结构损坏。

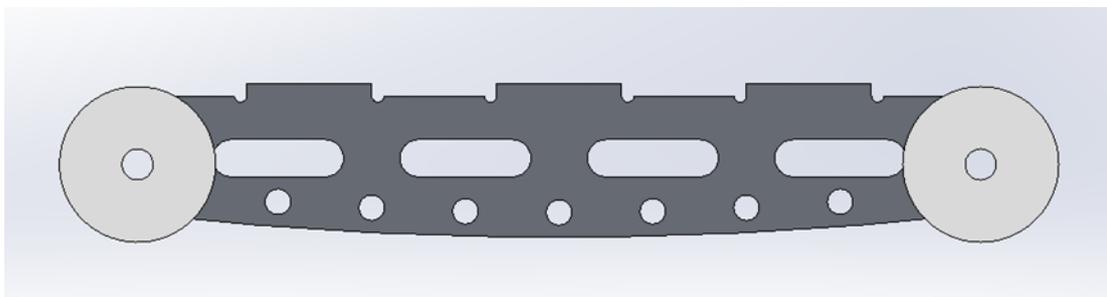


图-38 防卡弧形挡板

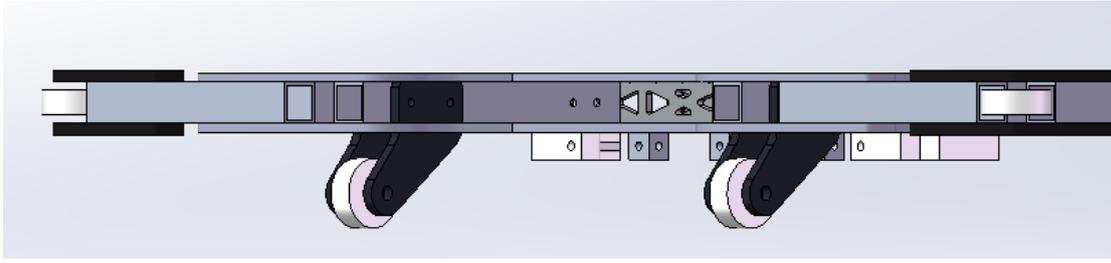


图-39 飞坡落地导向轮

4. 参考文献

4.1 机械部分参考文献

[1]轻量化设计指南

<https://bbs.robomaster.com/forum.php?mod=viewthread&tid=21769>

[2]「RM 圆桌」第十二期 拨弹机构的秘密

<https://bbs.robomaster.com/forum.php?mod=viewthread&tid=8461>

[3] RM2021-广东工业大学-DynamicX 机器人队-重力补偿机构开源

<https://bbs.robomaster.com/forum.php?mod=viewthread&tid=12323>

[4] RM2020-上海交通大学-交龙战队-步兵机器人机械技术开源

<https://bbs.robomaster.com/forum.php?mod=viewthread&tid=11054>

[5] 浅谈纵臂悬挂布置方式以及长度与夹角

<https://bbs.robomaster.com/forum.php?mod=viewthread&tid=11620>

[6] 【随笔】浅谈自适应底盘的原理（非独立悬挂）

<https://bbs.robomaster.com/forum.php?mod=viewthread&tid=11333>

[7] RM2021-上海交通大学-云汉交龙战队-英雄机器人-机械结构开源

<https://bbs.robomaster.com/forum.php?mod=viewthread&tid=12241>

[8] RM2021-华南理工大学-普渡华南虎-舵轮步兵机器人开源

<https://bbs.robomaster.com/forum.php?mod=viewthread&tid=12219>

[9] RM2021_深圳大学_RobotPilots 战队_自适应舵轮双枪步兵_机械开源

<https://bbs.robomaster.com/forum.php?mod=viewthread&tid=12325>

[10] RM21-哈尔滨理工大学荣成校区-SPARK 战队-平衡步兵-机械综合

<https://bbs.robomaster.com/forum.php?mod=viewthread&tid=12268>