



大连理工大学

DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

RoboMaster2022 参赛机器人英雄机器人机械 技术说明文档

大连理工大学凌 BUG 战队
2022 年 10 月



英雄机器人机械技术说明文档

摘要

在以往赛季中，英雄机器人一直作为最强劲的推塔单位活跃在赛场，新赛季狙击点规则的设置使英雄机器人承担了队伍几乎全部对建筑物伤害。本队英雄机器人 2021 年第一次参加超级对抗赛，并在强队的高压下对敌方建筑物造成了大量伤害，并完成了一次飞坡。本赛季在以往英雄的基础上深入研究，为满足机动性和稳定性的需求，通过理性分析和结构优化重构了并联的自适应悬挂机构；为提高发射精度，在大量分析和测试中优化发射机构的设计，通过优化迭代提高发射精度。

关键词：机器人、需求分析、结构优化、并联自适应悬挂机构、精准发射

目录

1. 英雄机器人	4
1.1 需求分析.....	4
1.2 机器人核心参数.....	5
1.3 方案设计.....	5
1.3.1 机械结构设计.....	5
1.3.1.1 底盘.....	5
1.3.1.2 发射机构.....	11
1.3.1.3 云台机构.....	18
1.3.1.4 供弹机构.....	23
1.3.1.5 工艺选择.....	24
1.3.2 测试实验.....	25
1.3.3 总结和展望	28
1.3.3.1 总结.....	28
1.3.3.2 展望.....	28
1.4 参考文献（5）	29

1. 英雄机器人

1.1 需求分析

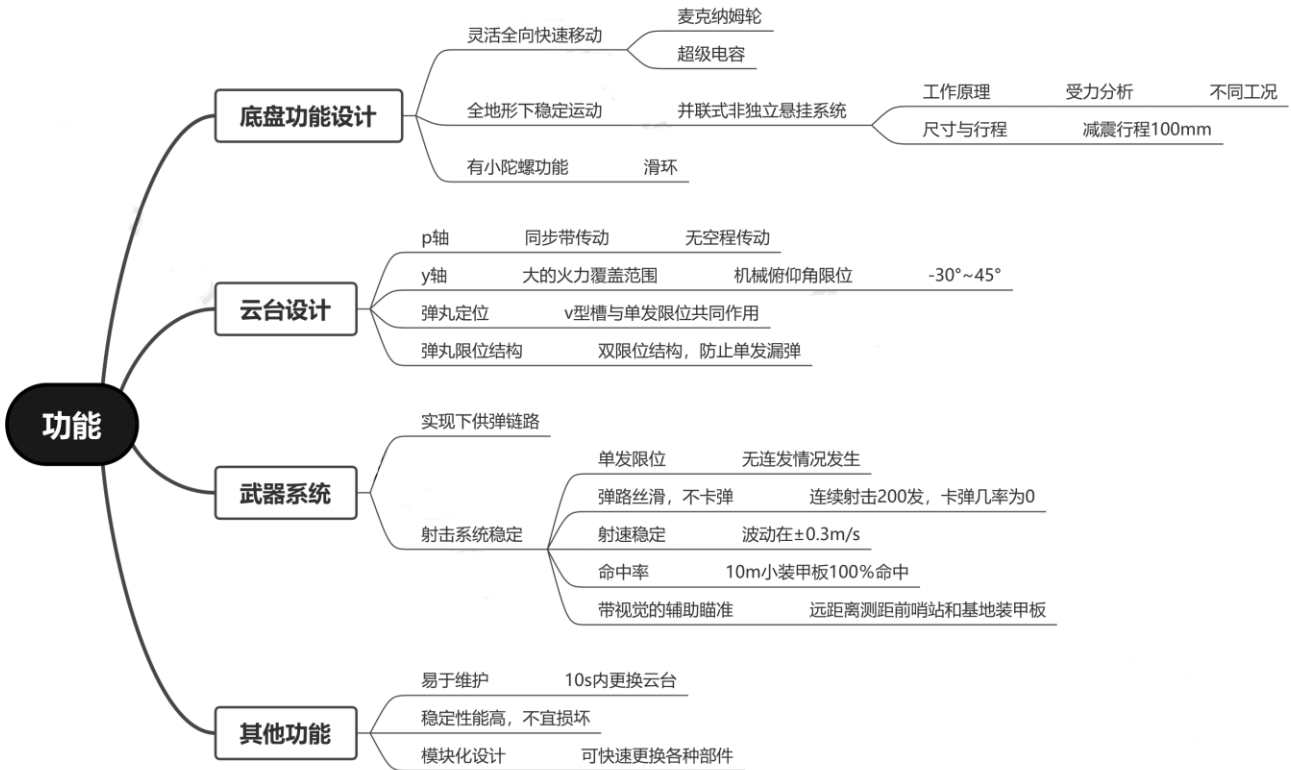


图 1: 功能定义

英雄机器人战术定位为稳定的推塔输出点，同时配合地面部队进行进攻和压制。为实现战术需求，要求英雄机器人有精准的弹道和稳定的底盘。

本赛季由于英雄狙击点规则的更改，以及前哨站下部旋转装甲板的加入，对英雄远距离吊射的精度有了更高的要求。较远距离下的吊射需要相当精准的弹道，也需要合理的吊射瞄准逻辑。本赛季英雄机器人采用长焦摄像头作为视觉输入，添加摄像头云台以保证视野。通过激光测距云台识别装甲板距离以确定吊射仰角。激光测距云台下挂于测速模块下方，防止测速模块遮挡。在比赛中英雄需要依靠稳定的发射精度快速击毁前哨战，以推动进攻进入下一阶段。

在本赛季的对抗场地中，飞坡的作用仍然非常重要，可以迅速穿过战场抵达敌方基地，同时英雄还需要能够在对方步兵的围追堵截中突围，因此对英雄的底盘性能有更高的要求。

此外，作为场上唯一的高伤害机器人，英雄机器人一旦出现故障的情况，进攻将无法推进，导致己方输掉比赛。因此要求英雄机器人具有很高的稳定性。

1.2 机器人核心参数

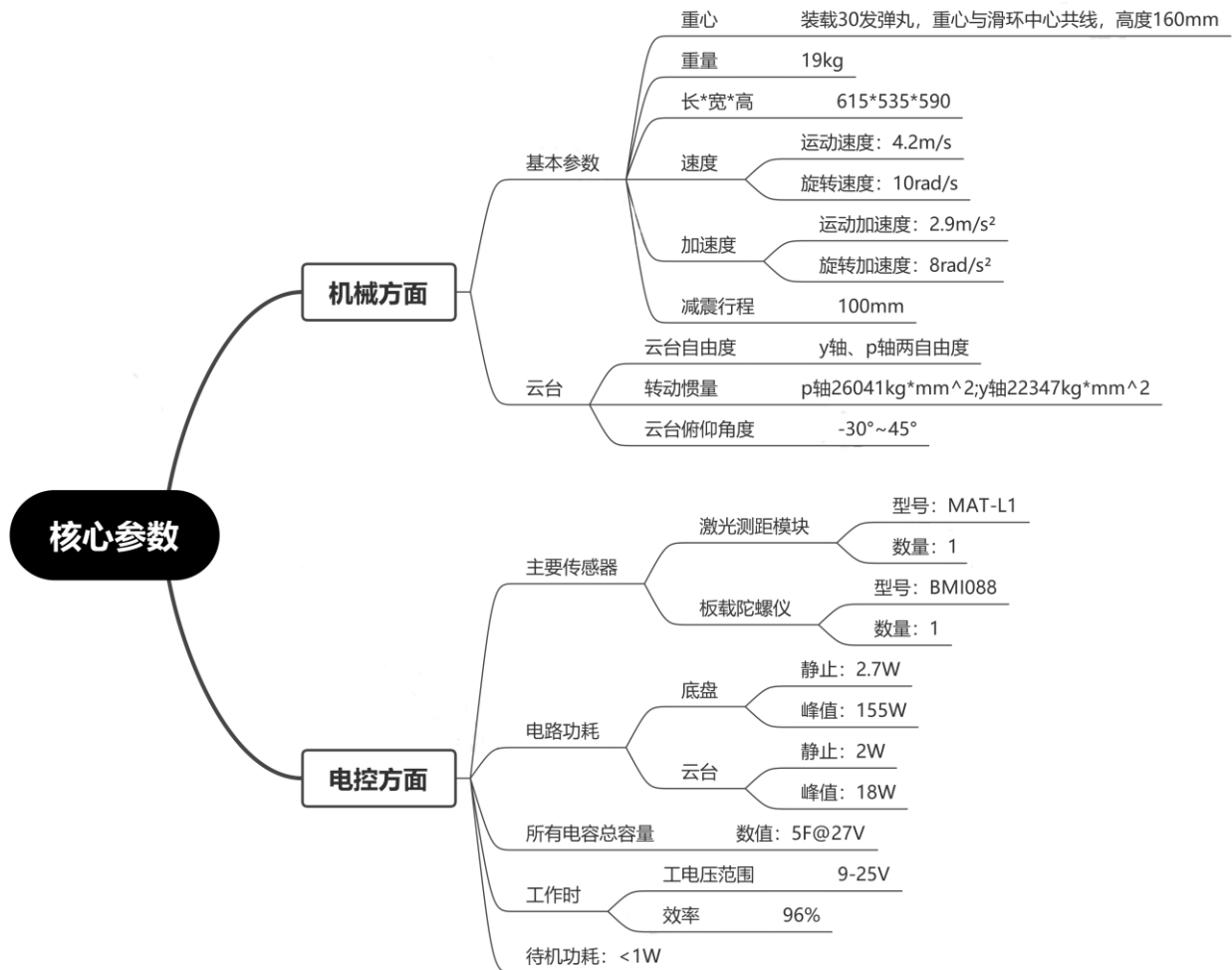


图 2: 核心参数

1.3 方案设计

1.3.1 机械结构设计

整车运用模块化设计, 采用下供弹方案, 可分为底盘和云台两部分作具体设计。

1.3.1.1 底盘

底盘主要功能为承载与保持车身稳定, 重点在于悬挂。本赛季英雄机器人仍采用自主设计的并联式非独立悬挂系统, 在以往设计的基础上进行改进和优化, 目的为在顺畅实现功能的前提下尽可能减轻重量, 为后续飞坡做好基础。底盘主要分为前、中、后三部分, 车身前方主要放置电池、继电器、超级电容等电控元件, 并护有外壳, 使用搭扣使其便于打开与关

闭，方便电池开关；车身中间为滑环和从弹仓伸出的部分弹路，弹路与滑环相接的地方需保证精度以确保弹丸可丝滑通过；车身后方为拨弹部分与弹仓，拨弹重新设计了电机安装座，使得拆装拨弹电机变得容易。车身左右两侧为悬挂系统，为更好的实现悬挂功能，本次在设计悬挂的时候，应用静力学知识对悬挂原理进行了分析，同时也利用了 Solidworks 和 Adams 对悬挂中重要的铝件和板材进行了应力分析与结构优化。

1.3.1.1.1 悬挂

悬挂方案设计

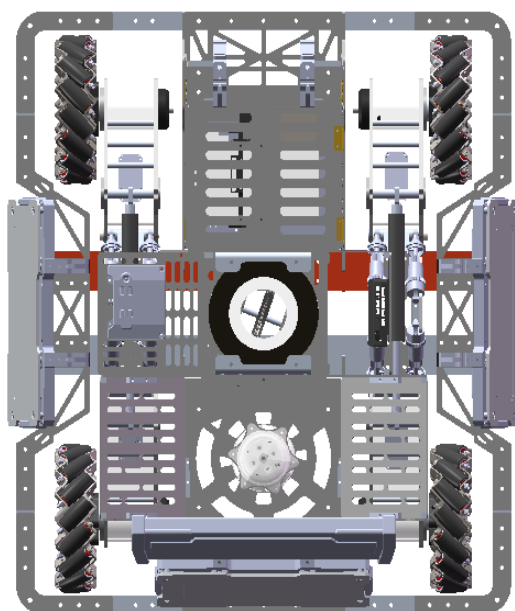


图 3：底盘整体图

如图 3 所示，左侧悬挂系统与右侧悬挂系统对称安装，为并联式，两侧悬挂可独立运动。减震系统初始安装状态为，前后弹簧减震器处于有一定压缩量的状态，弹簧减震器可伸长或者继续压缩，气弹簧处于未压缩或受拉未变形状态。同侧的前后麦克纳姆轮组通过气弹簧进行力的传递，使得前后轮的减震器能迅速响应前后轮压力的变化，因而任意一个轮子因特殊地形变化引起轮子对地面压力变化时，同侧另一轮子可以迅速适应此变化，同时一侧减震系统压力变化也会引起另一侧减震系统的自适应调节。

关于并联式自适应悬挂的具体工况和分析在以往的开源中已有介绍，此处不再赘述。

悬挂结构分析

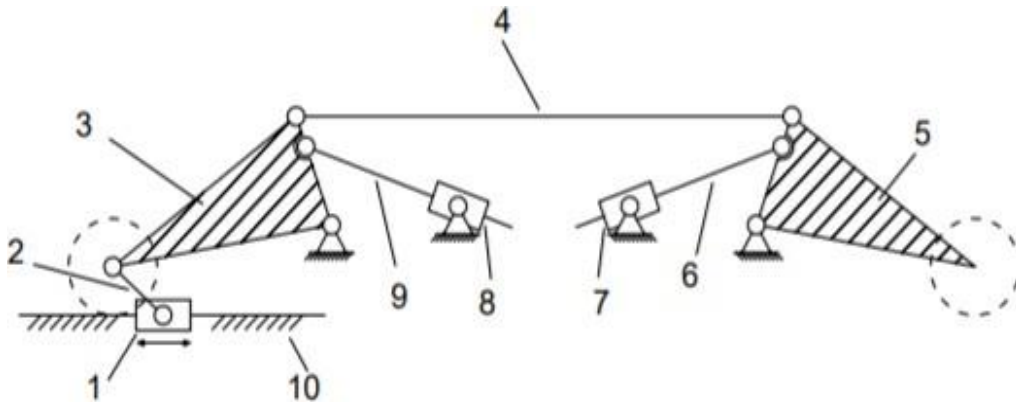


图 4: 悬挂机构简图

自由度计算： $F=3*9-2*13=1$ ，符合要求。

悬挂尺寸设计

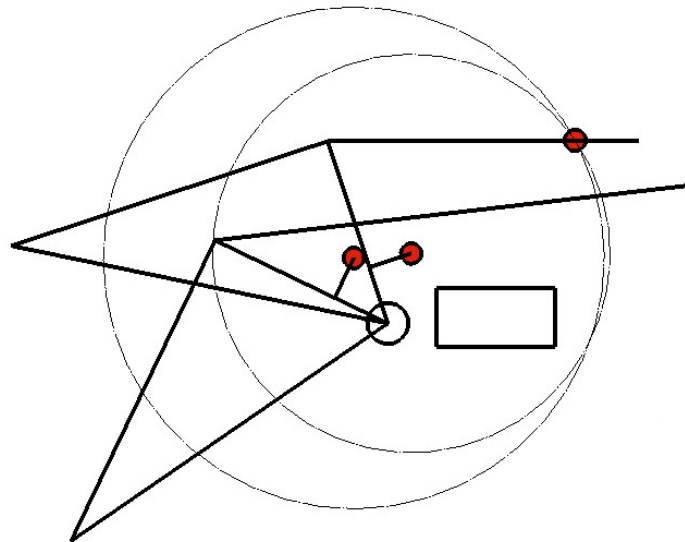


图 5: 悬挂尺寸示意图

如图 5 所示为减震器位置确定的原理图，图中摇臂分别处于上限与下限位置，此时计算减震器所受到的压力。此处设计应注意任意行程内位置上减震器的状态，由于减震器时刻压缩，如果尺寸设计不佳会导致两减震器推力差值过小，车架无法回正。

悬挂静力学分析优化

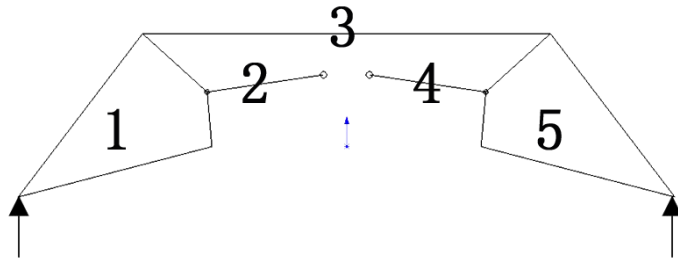


图 6: 平地状态

如图 6 所示, 1、5 为左右摇臂, 2、4 为与摇臂相连的减震器, 3 为连接左右摇臂的气弹簧。该图是英雄机器人处于平地时悬挂的状态, 此时左右减震器状态相同, 均受压, 气弹簧不压缩。整车重量预计为 19~21kg, 重力加速度取 9.8N/kg, 故每个车轮受到地面的支撑力为 46.55~51.45N, 即图中作用在摇臂上竖向力为 46.55~51.45N。依据原理图中的数据, 根据静力平衡关系, 计算可得 (结果保留整数): 减震器受压力, 范围为 136~150N; 气弹簧受压力, 范围为 128~141N。

图 7、图 8 序号所代表的器件与图 6 相同。

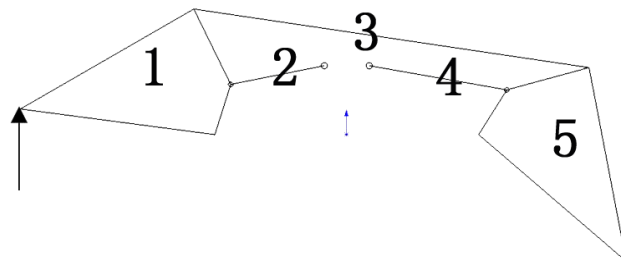


图 7: 左轮上抬

如图 7 所示情况为将左侧车轮上抬 50mm, 取向上的推力为 20N。此时左右减震器受力不同, 气弹簧不压缩。根据静力平衡关系, 计算可得 (结果保留两位小数): 2、4 号减震器均受压, 2 号减震器受压 55.35N, 4 号减震器受压 54.50N; 气弹簧受拉, 拉力为 54.87N。

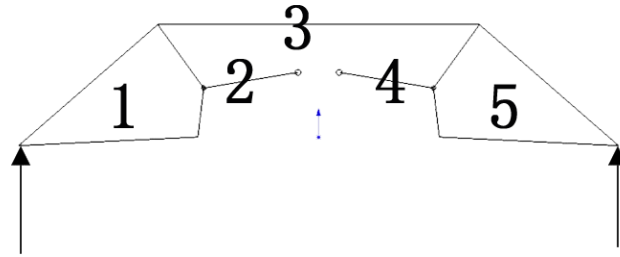


图 8: 四轮着地

如图 8 所示情况为车身从一定高度降落，四轮同时着地。此时，左右减震器受力相同，气弹簧压缩。取高度为 0.5m，车身重量为 19~21kg，重力加速度取 9.8N/kg，落地缓冲时间取 1.5s，假设车身在下落过程中做自由落体运动，由冲量公式计算得平均每只麦克纳姆轮受到的缓冲力为（结果取两位小数）：97.13N~107.36N。根据静力平衡关系，计算可得（结果保留两位小数）：2、4 号减震器均受压，均为 283.99N；气弹簧受压，压力为 266.86N。

以上设计计算过程为推导过程，目的是表示无论哪种悬挂机构，对其做优化设计的一般方法：首先根据机构简图，固定一部分参数（例如某些基座位置、杆长等），将其余参数作为未知数；此后便可以分别以各个铰接点、各个杆作为研究对象，列出对应的受力关系式，在得到完整的受力关系表图后，可转换为代码导入 matlab，找到各个未知参数对整体机构的影响，以此优化设计机构尺寸参数。

1.3.1.1.2 车轮轴系设计

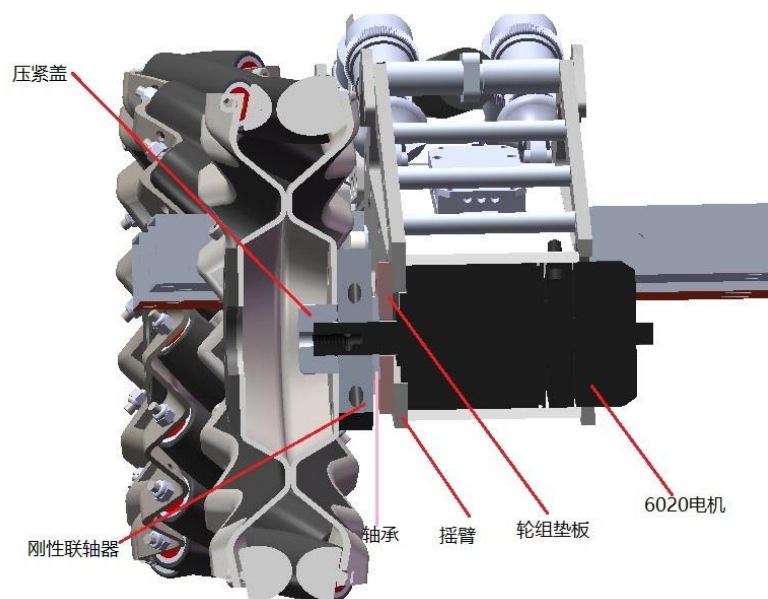


图 9: 麦轮轴系示意图

如图 9 所示为麦轮轴系示意图，整体来说，6020 电机通过梅花联轴器与麦轮相连，驱动

麦轮转动。6020 电机的定子通过电机上凸台以及四个螺纹孔固定于摇臂上；轮组垫板上开有孔用来容纳螺丝头，防止干涉；轴承与其两端的垫片用来减小垫板与刚性联轴器的之间的滑动摩擦，同时起到轴向定位；刚性联轴器与电机轴通过面接触起到周向定位，其上的六个螺纹孔与麦轮上孔通过螺栓连接；压紧盖的内径与电机输出轴径相同，其外径又与麦轮内径相同，使麦轮轴线与电机轴线处于一条直线上，防止因轴线不一致导致麦轮对电机产生偏距；压紧盖盖顶的通孔与电机输出轴轴向的螺纹孔通过螺栓连接，使得压紧盖与电机紧紧相贴，其对刚性联轴器等后续零件具有压紧作用。这样的设计既减小了麦轮转动的摩擦力，也规避了麦轮与电机不同轴对电机造成负面影响甚至损坏。

在恶劣环境（大风潮湿天气下的室外场地）的测试中，发现由于推力滚针轴承受潮以及异物进入，会导致其摩擦轮剧增经常需要更换，建议机械组提高轮组的检查频率，防止在场上出现类似问题。

1.3.1.1.3 拨弹盘设计

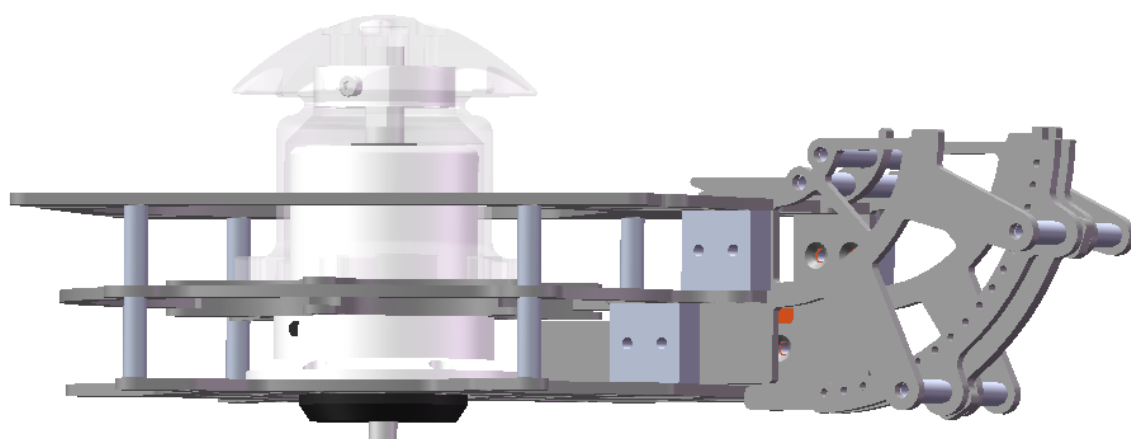


图 10: 拨弹结构侧视图

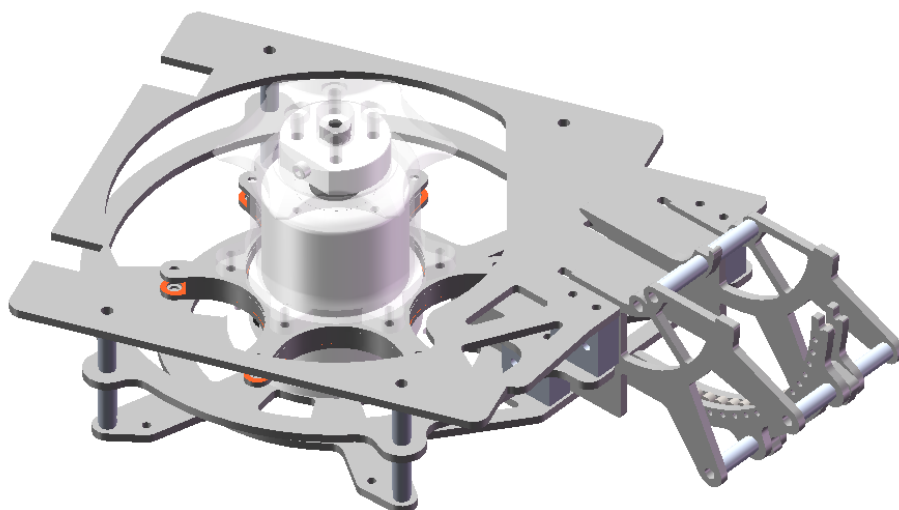


图 11: 拨弹结构示意图

如图 10 所示为拨弹结构侧视图，如图 11 所示为拨弹结构示意图。拨弹结构为三层碳板夹紧，从下到上一次为托弹盘、拨弹区围栏和弹仓底板。托弹盘顾名思义是用来承载弹丸，弹丸在其表面上，沿着一定的路线进行滚动，直至进入弹路；拨弹围栏其内表面与弹丸表面接触，是弹丸在转动时路径，应当着重考虑这里是否卡弹；弹仓底板用来分隔弹仓弹丸与拨弹中的弹丸。三碳板之间用铝柱控制间距。

此处弹路连接设计在测试中被证明存在一些问题，由于板材加工以及装配过程都存在误差，弯曲弹路与托弹盘之间会有一定的高度差导致卡弹，在装配后的唯一修正方法为使用锉刀除去突出部分，在设计中要注意连接处设计。

1.3.1.1.4 核心零件的应力分析与优化设计

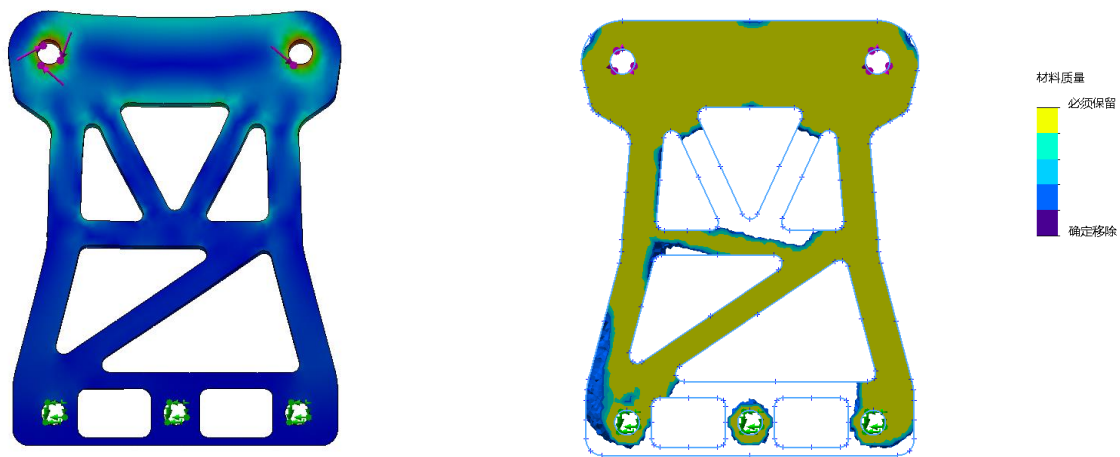


图 12：拓扑仿真

该零件为一侧悬挂系统上连接前后轮的碳板，这块碳板在悬挂系统中尤为重要，其受两个方向的扭矩和拉力，为合理设计这块碳板，我们使用了 solidworks simulation 和 Ansys 对其进行了应力分析，检查其强度是否符合使用要求；使用 solidworks 中的设计洞察功能中的拓扑算例对其结构进行了优化（如图 12）。

对于碳纤维板材来说，由于复合材料会具有一些普通材料（如玻璃纤维）没有的特性，在设计中应当给予考虑。

1.3.1.2 发射机构

1.3.1.2.1 需求分析

发射机构由摩擦轮及电机、铝制炮管、单发限位以及测速模块组成。发射机构是英雄机器人的核心，既要能实现稳定的发射和较高的精度，也需要可以快速检修和更换部件，以及调整弹道以改善散布。（见表 1）

表 1: 发射机构需求分析

内容	技术指标
射速	极差 0.5 以内可调整, 最高射速 16m/s
射频	稳定单发不卡弹, 最高射频 10HZ
稳定性	拨弹位置精确, 200 发射速掉速不超过 0.5m/s
发射精度	8m 小装甲板命中率 100%

1.3.1.2.2 发射机构设计

在分析上赛季经验, 并进行大量测试分析后, 总结了发射机构对散布的影响的三个设计重点:

发射机构参数设计

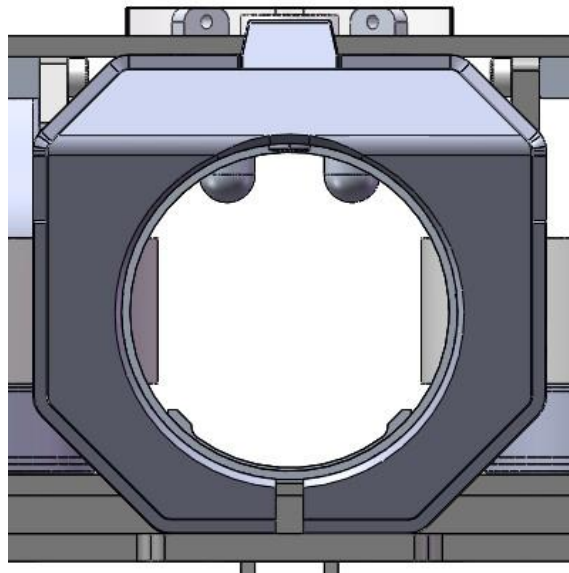


图 13: 发射机构

摩擦轮间距和高度、摩擦轮挤压量（包括摩擦轮形状和材质等）、摩擦轮与弹丸的接触位置、弹丸定位槽的尺寸参数、铝制炮管内径等因素, 都会对弹丸的散布产生不同程度的影响, 各个参数之间也互相影响。

由于很多影响因素无法或很难被量化, 建议对于这些参数的设计和调整建立在大量测试的基础上, 具体参数影响因素的确定可以通过设计实验, 分析测试结果后进行设计。本战队发射机构测试和优化见 1.3.2 测试实验。

我队英雄机器人选用 3508 转子作为摩擦轮电机, 通过 pid 控制; 通过大量测试后, 采用

60mm 直径、98mm 间距的直型摩擦轮设计。并严格控制板材厚度尺寸，使用 M3*16 的内六角螺丝固定摩擦轮，防止螺丝过度旋入损坏 7 pin 口。同时为保证摩擦轮发射机构的刚度，使用三层共 12.5mm 玻纤板材固定。（如图 13）

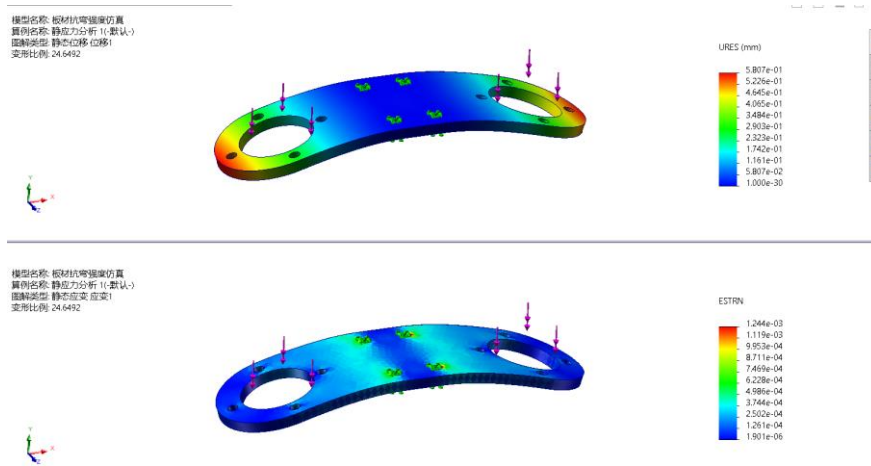


图 14: 导入弹性模量和负载参数仿真

在玻纤云台向碳纤云台的迭代过程中，经设计实验测试发现相对与玻纤板材作为摩擦轮固定件，碳纤板材固定的发射机构在连发中弹速周期性减小，导致竖直方向散布更大。分析两种材料弹性模量和负载关系，可以得到计算仿真对比。（如图 14）

经分析，碳纤维板材在弹性变极限范围内，其应力-应变特性对比玻纤板材没有明显劣势，猜测是碳纤维材料作为复合材料的特殊性质（层内力和层间力）导致了摩擦轮固定板“变软”的结果。具体原因有待进一步研究，但已有的实验结果足以看出，此处加固板应使用玻纤材料更佳而非碳纤维板。

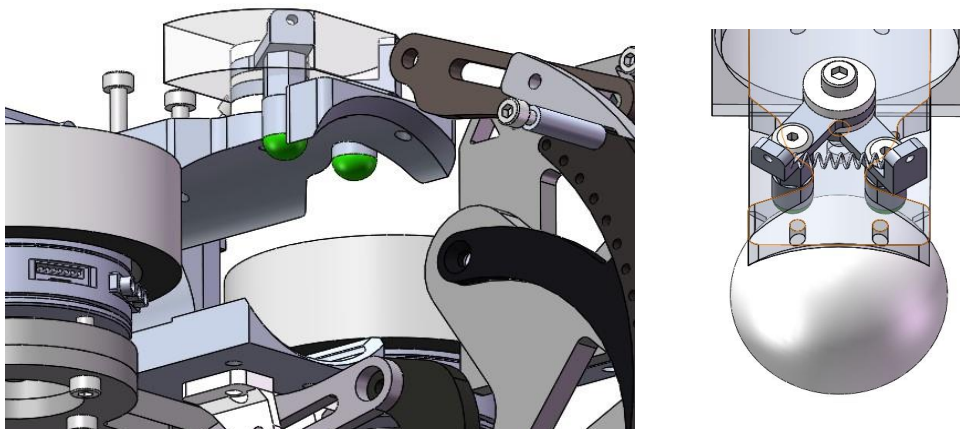


图 15: 单发限位机构

单发限位机构使用由拉簧提供张紧力的铰链机构，可以通过更换拉簧调节限位张紧力。如图 15，图中绿色部分同时与弹丸接触，通过 M4 螺丝固定在铰链机构上，外包加工且需要制定表面粗糙度；铰链机构错开高度，通过 14-4-4 推力滚针轴承直接安装在炮管铝件上。

在实际装配中，此处螺丝不宜旋紧，应使用中强度螺纹胶固定作为转轴使用，压紧力以

铰链机构可以顺滑转动，且不晃动为宜。

当铰链机构张开，弹丸可以通过。当弹丸刚好接触摩擦轮将被击发时，限位机构将弹丸下压在定位槽上，以保证每一颗弹丸在发射前与摩擦轮的相对位置相同，提高发射精准度。该单发限位机构的另一个优点是，由于限位天生自带需要增大阻力使弹丸被限位和需要减小阻力使发射时弹路顺畅的需求矛盾，当弹丸发生意外的位移时，限位拉簧不需要较硬，只要足够使铰链机构自回正的拉力，防止由于拉簧选用过硬导致卡弹问题，双限位机构即可以将弹丸夹住在中间，有效避免误发弹情况发生。

关键部件的定位

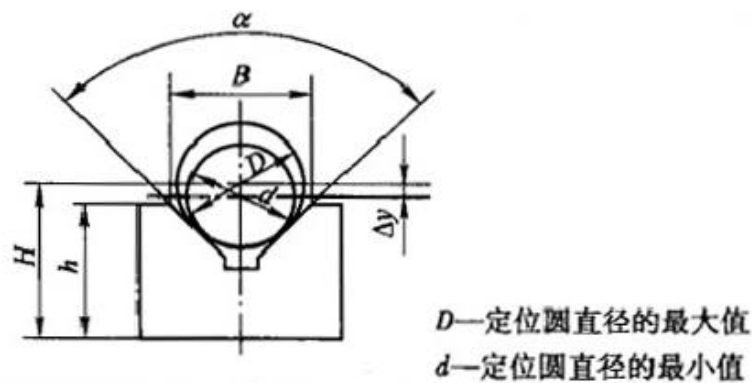


图 16: V 型槽定位

弹丸在发射前的定位方式是由限位装置下压在与铝制炮管一体的 V 型槽上，使弹丸同时与 V 型的两个平面相切。如图 16 为 V 形块的尺寸及定位误差的计算公式。当工件以外圆柱面与 V 形块配合定位时，会由于定位不准造成工序尺寸或位置要求方面的定位误差。

表 2: V 型块定位误差计算

计算项目	符号	计算公式			
		α	60°	90°	120°
V 形块的工作角度	α	α	60°	90°	120°
V 形块基面到定位圆中心的距离	H	$H = h + \frac{D}{2\sin\frac{\alpha}{2}} - \frac{B}{2\tan\frac{\alpha}{2}}$	$H = h + D - 0.886B$	$H = h + 0.707D - 0.5B$	$H = h + 0.577D - 0.289B$
V 形块的开口尺寸	B	$B = 2\tan\frac{\alpha}{2} \times \left(h + \frac{D}{2\sin\frac{\alpha}{2}} - H \right)$	$B = 1.155(h + D - H)$	$B = 2(h + 0.707D - H)$	$B = 3.464(h + 0.577D - H)$
定位误差	Δy	$\Delta y = \frac{D-d}{2\sin\frac{\alpha}{2}}$	$\Delta y = D - d$	$\Delta y = 0.707(D - d)$	$\Delta y = 0.577(D - d)$

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

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

同时，对于发射机构的关键部件，经过分析和测试后，对于需要严格定位的几个重要部分进行了重点设计：

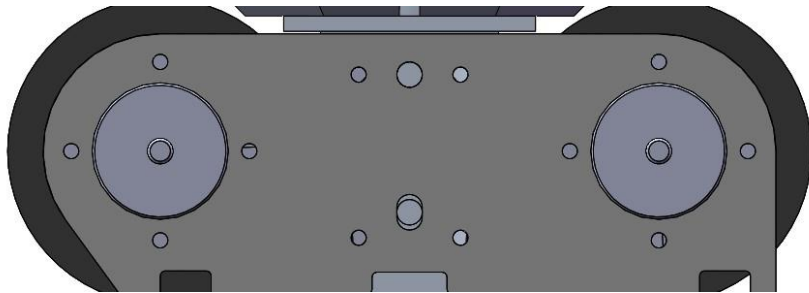


图 17：核心碳板定位孔

发射机构的主体结构均以一块一次对刀加工的碳板作为定位基准，对铝制炮管以及两个摩擦轮电机进行定位。该碳板作为核心部件对精度要求较高，建议外包加工制作（如图 17）。

3508 转子有用于定位的凸台，其尺寸精度足够用于与碳板间隙配合，以定位两摩擦轮位置。因此合理设计了与弹丸定位槽一体的铝制炮管，以使摩擦轮可以在不加装碳板垫高的情况下正常工作，保证定位精度。然而在实际装配中，由于加工误差，可能会出现无法装入或摩擦轮底面与碳板上表面无法紧密压紧的问题。此时应使用少量润滑油尝试过盈配合使其能成功紧固，若仍无法压紧，则该核心碳板无法再二次返工，只能报废重做。

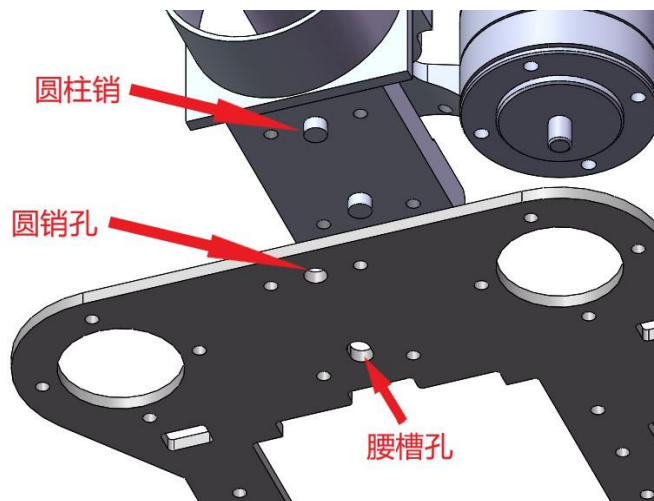


图 18：核心碳板定位孔

针对铝制炮管，其定位要求为其中心线与摩擦轮对称线重合。在核心碳板上设置了一对定位孔，可以使用两个定位销保证定位精度。图 18 中铝制炮管上的两个定位销均为圆柱定位销，核心碳板上的小孔则一个为圆销孔，另一个为腰槽孔。这样做的目的是降低两个定位销孔的孔间距加工精度要求，降低加工成本。定位销与销孔的配合采用过渡配合。

发射机构的损耗与检修

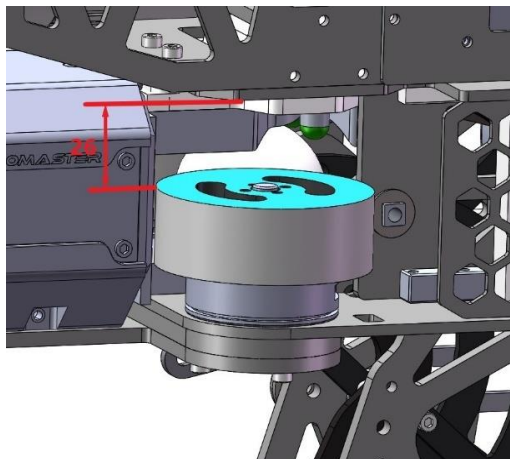


图 19：摩擦轮更换空间

在前期进行的发射测试中，发现了当弹丸发射次数很多时，会从某一时刻开始出现无法通过调整发射机构矫正的散布变差，在反复测试和已有资料的研究后，将此刻确认到第 400-600 发左右，此时摩擦轮达到寿命，必需及时更换。因此在设计云台时进行了便于拆装摩擦轮的设计（如图 19）。

另外，在环境湿度、温度、弹丸种类等参数变化后，弹丸表面阻力也会变化，需要在设计中保证限位机构容易被检修和更换（弹簧）。

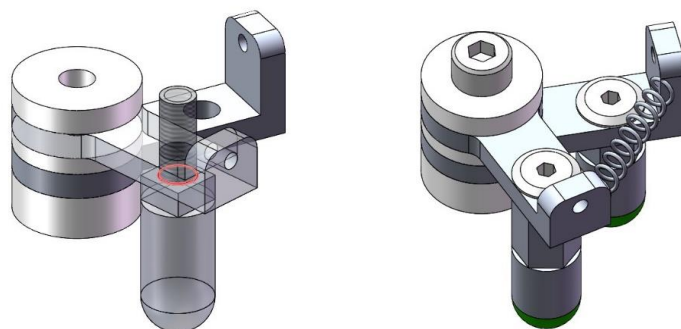


图 20：限位安装方式对比

除摩擦轮外，弹路导轨、单发限位在大量弹丸的摩擦后也会有不同程度的磨损现象发生。当单发限位装置不对称时，施加给弹丸的压力也将不对称，会加重对一侧弹路导轨的磨损，导致长时间后弹路导轨偏移。

因此针对限位机构的安装进行优化（如图 20），由于在加工工艺中，为降低成本，外螺

纹与工件的连接处一定会存在或大或小的倒角，如果忽略该倒角直接与铰链板紧固，会导致面与面之间不能紧密配合，限位机构歪斜而不对称。因此采用如图 19 所示的内螺纹铝件，通过螺栓紧固使两个面可以紧密配合，保证限位机构对称。

同时为防止螺丝头干涉拉簧，选用 M4 薄头螺丝进行紧固。

1.3.1.2.3 发射调试

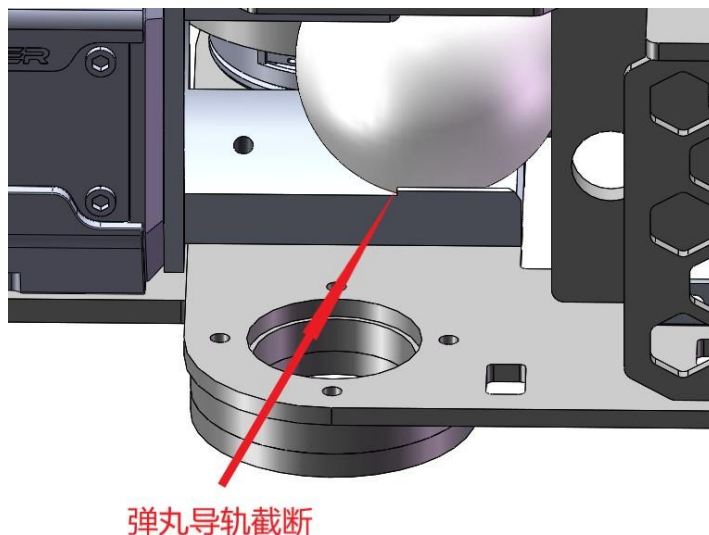


图 21：铝制炮管设计

根据以往调教发射的经验，弹丸在通过摩擦轮击发之后，如果触碰到炮管内壁或测速模块内壁，并不会矫正偏移的弹道，而会使发射散布严重变差。因此要求弹丸接触摩擦轮后将不再与除摩擦轮外的任何部件接触（如图 21），同时也要求测速模块能够定位至与摩擦轮对称线同轴。

炮管铝件采用一体的薄壁铝管进行测速模块的定心定位。以下指出调整测速模块定心定位的方法：

可以通过观察散布图确定测速模块的定心定位问题。当定心定位偏移不大时，其发射散布特征为：与测速模块有接触的弹丸和与测速模块无接触的弹丸分别形成中心不同的两个散布分布，且与测速模块有接触的弹丸散布分布半径更大。当定心偏移较大时，大量弹丸与测速模块碰撞，导致大多数弹丸弹道偏移，整体散布极差。

针对具体寻找弹丸与测速模块碰撞的原因，可以使用粉笔填涂测速模块内壁的方法。具体实施方法为：在测速模块内壁前端均匀填涂粉笔，并拍照留存照片以便于后续进行对比；英雄进行对应状态下的 50 发弹丸连发，若测速模块内壁粉笔笔迹出现单点明显痕迹，则可确定碰壁位置；若出现多点痕迹，则检查发射机构是否有安装问题或损坏。

若确定发射机构没有安装和定位问题，则可以通过拧松测速模块的 M3 张紧螺丝，进行微调后重新固定，重复此操作可以解决大多数碰壁问题。若无法通过微调解决，则应检查发射机构，通过拧松紧固摩擦轮电机的 M3 螺丝重新定位电机，或垫纸微调摩擦轮高度。

1.3.1.3 云台机构

1.3.1.3.1 需求分析

云台需要稳定搭载发射机构以及各种电控、视觉元件，要求在强度足够、稳定性足够的前提下合理布局，减小重量。同时，云台需要预留充足合理的走线空间，以保证电路的稳定性，并为电控元件提供保护。

表 3：云台机构需求分析

内容	技术指标
YAW 轴	50mm 内径导电滑环，交叉滚子轴承轴系，稳定 360°旋转
PITCH 轴	平行四边形连杆，无左右晃动，转动惯量小
俯仰	稳定不卡弹俯仰角-30°~45 度，发射精度以大仰角优先
电控元件搭载	合理布局，为电控元件提供充足保护
承重架	保证刚度足够，镂空减重，便于滑环出线
模块化设计	方便更换和拆装零部件，提高检修效率
云台弹路	顺畅不卡弹，受力合理，保证发射稳定性

1.3.1.3.2 云台机构设计

云台主体设计

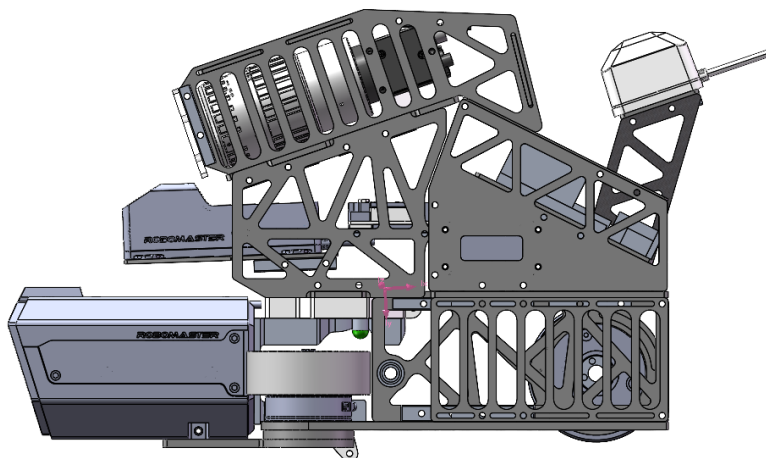


图 22：云台重心位置

本赛季英雄机器人使用 jetson NX 代替了 manifold，同时使用了布线 PCB 以整理云台混乱的布线，因此在云台设计中需要充分的考虑电控元件走线的空间和保护。相比于以往赛季使用的 manifold，NX 体积更大且重量也更重，因此仍然可以通过合理布局使用 NX 和 GM6020 进行云台的配重(如图 22)。

由于平行四边形连杆的特性，6020 星爪在云台俯仰时不会发生角度变化，因此可以将 UWB 模块安装于 6020 上，节省空间和重量。

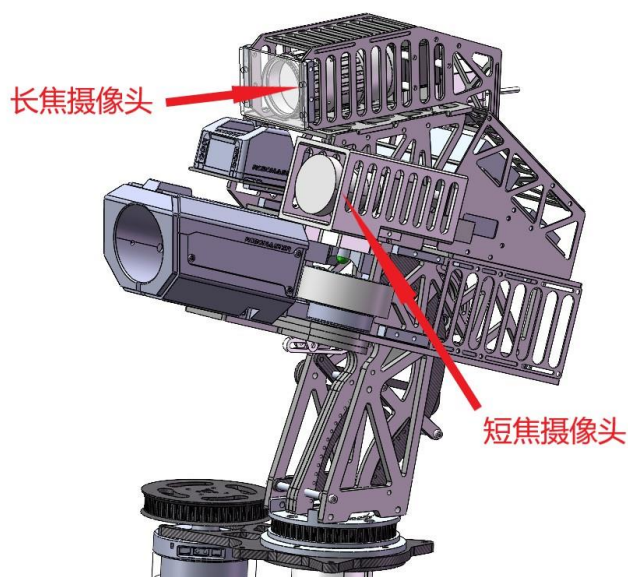


图 23：图传摄像头位置示意

由于本赛季英雄狙击点的规则调整，英雄的传统图传摄像头安装方式很难满足吊射的需求，因此设计了可根据比赛需求拆卸更换的图传摄像头安装位（如图 23）。图传上方长焦摄像头在吊射前哨站时可以识别前哨站小装甲板，并计算装甲板与英雄发射机构的相对位置，以辅助算法部分完成对前哨站的瞄准。为使英雄在抬头瞄准时可以实时测距，以 16m/s 弹速计算，将摄像头预置角度，与发射机构夹角 20° 。

图传和摄像头的固定选用镂空的 5mm 碳板，同时从两侧夹紧安装板形成箱体，增加图传和摄像头的稳定性。同时箱体外侧可以加装侧挂的短焦摄像头，用于视觉识别敌方地面机器人和哨兵，进行自瞄跟随。

云台弹路设计

英雄云台弹路分为主弹路和连接发射机构弹路两部分。为防止弹路变形导致弹丸卡弹，弹路内侧板材不可承受云台的重量。

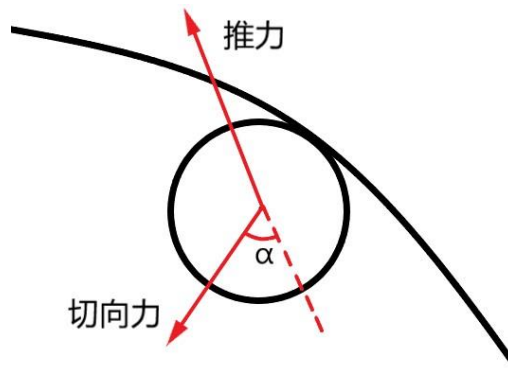


图 24：弹丸受力示意图

对于位于弹路中、受后一颗弹丸的推力而前进的弹丸，在弹链中所受到的力如图 23 所示。忽略弹丸自身重力；第二颗弹丸对前一颗弹丸的推力方向为两弹丸重中点连线的延长线方向；忽略沿垂直于纸面方向弹路对弹丸的平衡的支持力，则弹路对弹丸的压力方向为沿垂直于弹路切线方向；此外，弹丸还受到与弹路内壁之间的摩擦力，且该摩擦力大小与弹丸和弹路内壁间的压力成正比。

综上所述，作为推动弹丸在弹路中前进的力，设前后两弹丸中心的连接线与弹路切线夹角为 α ：当 α 为 0 时，弹丸受推力方向与弹路切线方向相同，弹丸在弹路中前进不受阻力；随着 α 逐渐增大，推力沿垂直于弹路切线方向的分力逐渐增大，弹路内壁与弹丸间的摩擦力也逐渐增大，推力沿平行于切线方向的分力逐渐减小；当 α 达到 90° 时，推力与弹路切线垂直，此时沿平行于切线方向的分力为 0 ，弹丸将完全卡死，无法被继续向前推动。

由此可以得出结论，设计弹路结构的要点之一，是要时刻关注弹丸所受推力方向与弹路切线的夹角。卡弹的真正含义是弹丸沿切线方向的分力过小或被摩擦力抵消，因此连续的，没有间断的弹路也可能出现卡弹的问题，设计弹路时应通过计算夹角大小或合力大小来设计弹路形状和尺寸。

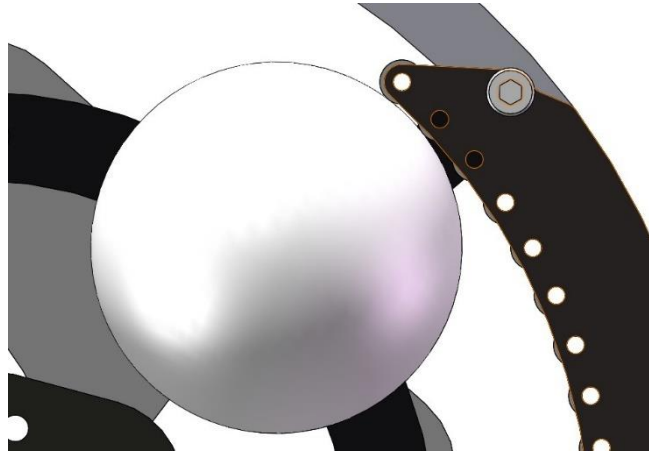


图 25：弹路小轴承

推力沿垂直于切向方向的分力增大会使弹路与弹丸间的摩擦力增大，该摩擦力一般通过使用小型号轴承来减小，但即使是使用小型号轴承，也会改变弹路的原有形状（小轴承排布不可能如理想状态下密集所致，如图 25），因此在设计弹路小轴承时，也要注意尤其是上弹路半部分小型号轴承与弹丸之间的相对位置，防止由于轴承中心与两颗弹丸中心连接线重合导致的卡弹问题。

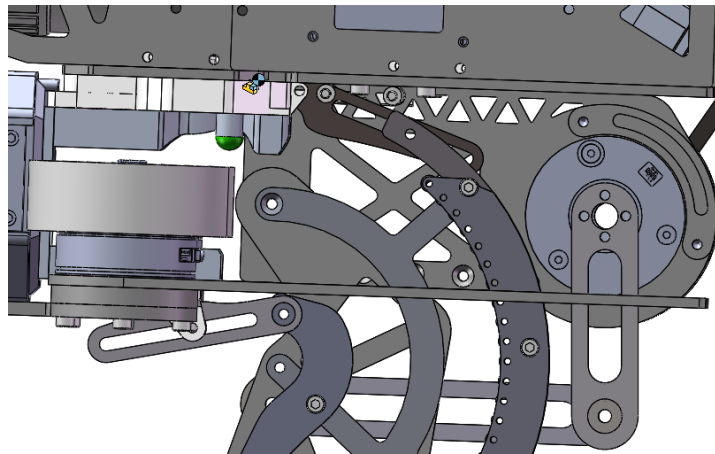


图 26：云台可动弹路

在以往的赛季中，本战队英雄的云台弹路连接为弹路与发射机构通过 pitch 轴直连，而非通过两个直角弯后进入发射机构的方案。这种传统的直连下供弹弹路在使用中除了弹链长度随云台俯仰角改变的问题外，也存在弹路连接处易卡弹的问题。对于较为经典的交错弹路连接设计，即下供弹弹路与发射机构弹路交错位置，互相对接：在大量测试和实际使用中发现，该方案仅能满足较小俯仰角下的流畅发射，在俯仰角绝对值过大时，会出现于连接处或发射机构入弹口处的卡弹问题，该问题的发生由弹丸在弹路中的受力状态决定。

本赛季英雄机器人在优化弹路的同时，为提高可以流畅供弹的最大绝对值俯仰角，在原有的下供弹弹路和发射机构弹路交错连接的方案的基础上，在上、下各添加了两段可动弹路（如图 26）。

云台承重架设计

英雄云台承重架使用两块厚度 6mm 的碳板，同时通过拓扑分析，在保证刚度足够的前提下进行减重。

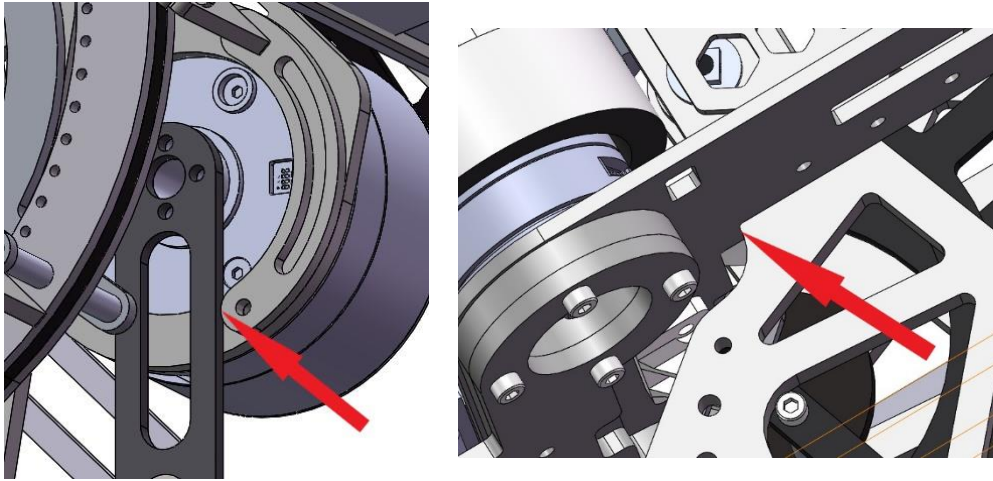


图 27：云台俯仰角限位位置

云台 pitch 轴通过 6020 电机驱动平行四边形连杆控制，其俯仰角机械限位实施方式为：仰角限位通过 6020 安装板另一面的限位板限位；俯角限位通过云台底板与承重架之间阻挡限位（如图 27）。

英雄机器人 yaw 轴使用交叉滚子轴承设计轴系，同步带尺寸为 178XL，使用碳板制作同步轮。由于受刀具直径限制碳板不能达到 10mm，将同步轮拆分为两块完全相同的 5mm 碳板进行二维铣床加工，降低成本。注意在装配同步带时需要张紧。

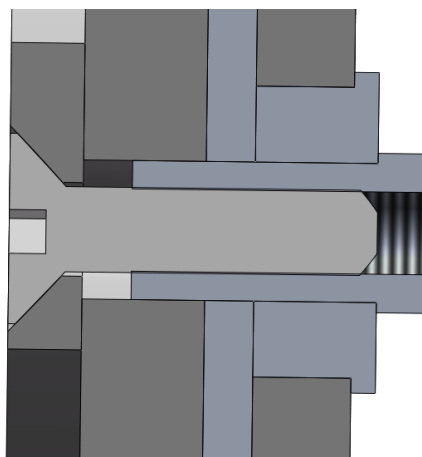


图 28 pitch 轴轴系

众所周知，螺丝不可用来承受径向的弯矩，因此在 pitch 轴设计了内 M4 螺纹的铝制轴套，通过将法兰轴承与推力滚针轴承紧固形成轴系。轴套外侧可做成方形，方便装配时使用尖嘴钳夹紧（如图 28）。

1.3.1.4 供弹机构

1.3.1.4.1 需求分析

供弹机构对于英雄来说极其重要，需要能够稳定流畅供弹。

表 4：供弹机构需求分析

内容	技术指标
拨弹盘	流畅稳定拨弹，精准控制角度
弹路	流畅不卡弹，不受力防止变形
弹仓	容量 40~50 发，破坏上层弹层以防止弹丸卡死不下落

1.3.1.4.2 拨弹结构设计

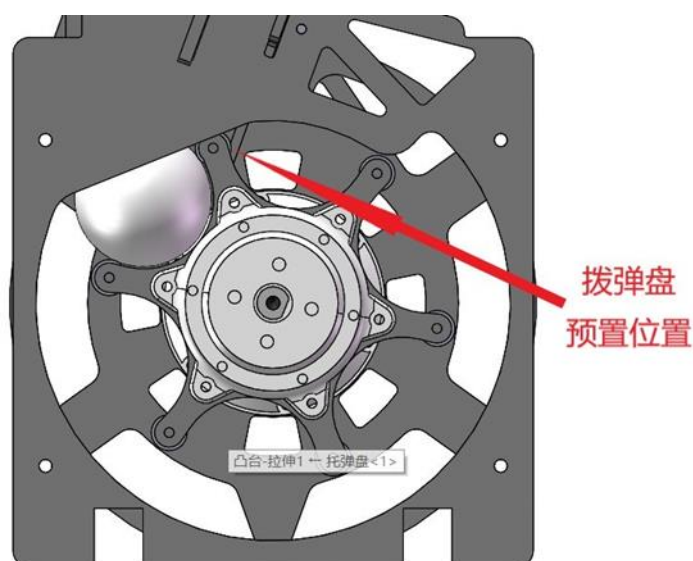


图 29：拨弹盘预置位置

为避免双发现象和卡弹现象的发生，以及保证发射稳定性，要求英雄发射前必须预置拨盘位置，如图 29 所示，以拨弹轴承与挡板相切为初始预置位置。同时，在大量测试和实验中，证实了弹丸在受较大推力和受较小推力接触摩擦轮后，弹丸初速度确实有 0.5m/s 左右的波动，因此拨弹盘的预置位置浮动也将很大程度上影响发射的精度。

然而在大量的测试工作中，发现拨弹盘由于无法闭环控制，会积累角度控制的误差导致拨弹盘预置位置发生偏移，导致英雄出现双发和轮空的问题。针对此问题，建议在后续研发中尝试使用红外开关等传感器以矫正拨弹盘位置，防止拨弹盘电机误差积累，或机器人死亡后拨弹盘找不到位置的问题。

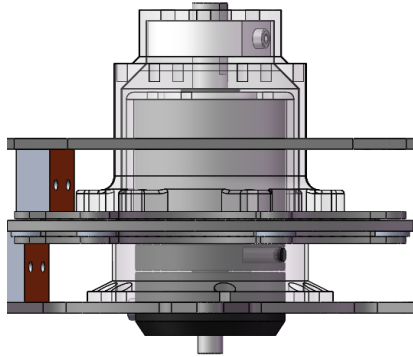


图 30：拨弹 3508 电机安装

在上赛季的英雄测试中，发现拨弹盘存在着弹丸互相挤压，无法落入拨弹盘中的问题。原因为拨弹盘上方的 3D 打印件形状设计不合理，导致弹丸在拨弹盘上方形成弹层。本赛季英雄将拨弹 3508 电机抬高，使拨弹盘上方增高，弹丸没有堆叠的空间，可以正常落入拨弹盘中（如图 30）。同时这种设计可以将 3508 转子抬高藏入车底，防止下台阶时撞击 3508 转子导致损坏。

1.3.1.4.2 高强度板间连接

即使用通孔空心铝柱组为夹层，螺栓夹紧两块板材。此连接结构通过最小单元限制板与板之间的间距，通过组合可减小板材受力时产生的挠度，增强了结构稳定性，同时可随板材的形状变化 进行调整。

1.3.1.5 工艺选择

整车主要采用碳纤维板材和 6060 铝方管及铝件、少数 3D 打印件，主要工艺为 2D 雕刻，车铣加工等，部分为保障精度外包工厂加工，部分使用实验室的铣床、车床、3D 打印机等自主加工。由于钣金件精度不够，铝件价格贵且精度亦有不足，尽量减少钣金件和铝件的使用。必要的钣金件按照铝件的标准外包加工。在装配过程中，对于有疑问的板材，可以先铣价格低廉的环氧板做实验，合适后再铣碳纤维板。

1.3.2 测试实验

本赛季英雄机器人在设计过程中，在经过了技术交流对发射方案的反复测试和分析后，针对影响发射散步的因素，猜想了可量化和不可量化的影响。为此设计了 42mm 大弹丸发射测试平台，以控制变量，分别探究这些因素对散布的影响方式。

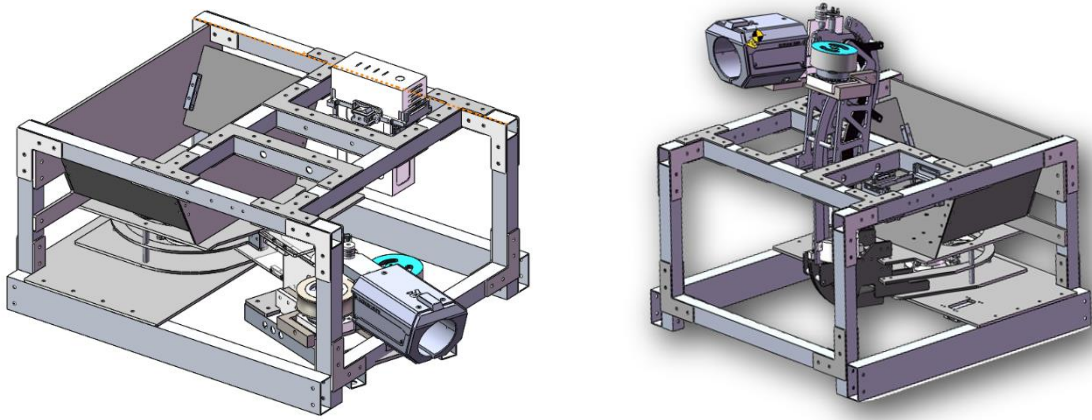


图 31：两代发射测试平台

发射测试平台目前共迭代两版（如图 31），第一版平台由拨弹盘和发射机构直接连接组成，无自由度并完全固定以消除云台不稳定对发射的影响；摩擦轮严格定位并可通过加减垫片调节间距及高度。第二版平台增加了可锁死的 pitch 轴，以加入弹路连接设计对发射的影响。

在第一阶段的测试中，底座使用钢材料基准面，重点测试了摩擦轮形状、摩擦轮预热、导轨形状以及拨弹盘转动等因素对发射稳定性的影响。在直形摩擦轮 5600 转速发射测试中，先后调整了两次导轨及摩擦轮定位后，弹丸平面散布图中 X 轴方向散布明显有好转，但 Y 轴方向散布几乎没有变化。在多次反复实验后发现由于拨弹盘电机没有位置反馈，在发射 100 发弹丸后有约 10mm 的误差积累，由此猜想弹丸发射时拨弹盘推力大小会影响发射 Y 轴散布，并根据猜想设计了实验。

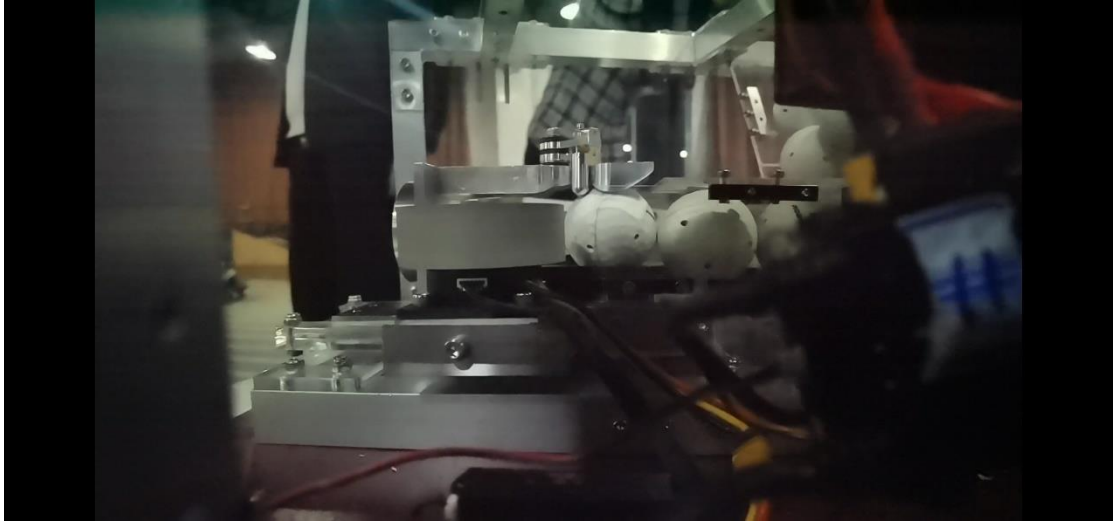


图 32：实验过程

发射机构使用透明亚克力材料装配配合慢镜头摄像机观察弹丸状态，并反复测试分析每发弹丸发射前状态及对应的落点位置。第一颗弹丸必然由第二颗弹丸提供推力通过限位并接触摩擦轮，然而逐帧分析慢镜头视频发现，一些弹丸在通过限位接触摩擦轮前即与第二颗弹丸分离，即失去了第二颗弹丸提供的推力，依靠惯性向前滚动并接触摩擦轮。这种情况不仅在大仰角时可能导致“卡膛”无法发射，这类弹丸在 Y 轴方向的落点相较于受第二颗弹丸推力的同时接触摩擦轮的弹丸落点明显偏低，这一点在 1000 发弹丸的发射测试中得到证实（如图 32）。

因此，在新赛季英雄设计中重点考虑了所有已知的对发射的影响因素，进行云台及发射机构的设计。传统直连下供弹弹路具有弹链短、直角少、重量轻等优点，但一直存在弹链长度会随着云台俯仰角变化而变化的缺点。同时结合已经得出的实验结果分析，总结出英雄发射机构的两个要点：

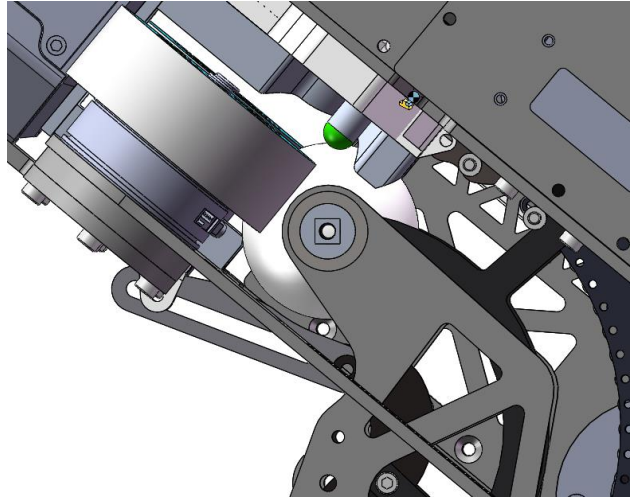


图 41：弹丸预置位置

(1)大弹丸在处于刚好接触限位且未通过的预置位置时，应使弹丸中心与云台 pitch 轴重合。这时无无论云台俯仰角度怎样变化，第一颗弹丸距离限位及摩擦轮的距离都不会改变，每次发射时第一颗弹丸与第二课弹丸之间的推力也会基本保持一致（如图 41）。

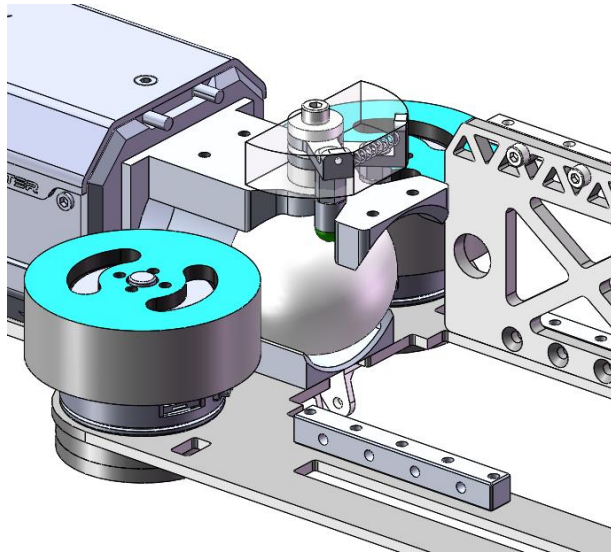


图 42：弹丸击发位置

(2)大弹丸应当在刚好完全通过限位机构时接触摩擦轮。此时弹丸同时受到限位机构和导轨的压力，定位效果更佳，且大仰角时也没有卡膛的空间（如图 42）。

1.3.3 总结和展望

1.3.3.1 总结

在一年的研发周期中，本队英雄机器人主要走求稳路线，在关键机构的设计没有做颠覆性的改动，主要工作是在先前不成熟的设计的基础上进行迭代和优化。经历几代的优化迭代，并联式自适应悬挂基本已经优化完成，目前可以在提供足够底盘性能和稳定性的同时减小重量，并将气弹簧内置于减震器中间防止与外部部件干涉，已达到现阶段最佳的设计效果。如果仍要优化底盘性能则需改变悬挂机构。发射精度逐步推进研究，目前测试中的最好成绩为 11 米小装甲板 10 中 8。整车经拓扑优化已减重到极致，同时进行的强度校核保证了各个关键构件强度足够。

但是为什么如此性能的机器人，在分区赛的赛场并没有取得令人满意的成绩呢？

痛定思痛，需要总结经验才能避免重蹈覆辙。在前期研究中，由于战队管理出现问题，各兵种进度不能协调推进，各扫门前雪的同时还有组别进度停滞不前，导致赛前一两个月的时间里压力剧增，很多测试和性能研究由于时间紧迫被放弃，直接导致机器人在分区赛现场出现了大量没有预料到的问题。同时，由于缺少对比赛的准备和思考，很多场内的影响因素被忽略，也没有提前做暴力测试和多工况测试，使得机器人在赛场环境下性能大幅下降，出现问题时队员束手无策。

总结后不难看出，参赛队伍必须尽快形成一套完整的、规范的、可执行的设计体系和管理体系，积极与其他队伍交流的同时强化队内纪律和进度把控。不让无意义的工作占用精力浪费时间，也不让有必要的工作因为时间紧迫而被放弃。

1.3.3.2 展望

在下一个研发周期开始之际，希望能够尽快在队内建设完善的规范体系，强化进度把控和工作安排，注重对赛场环境的思考和测试，以及与其他学校的技术交流。只有吸取上一个赛季的经验教训，才能推动战队继续发展。

同时希望本开源可以为其他参赛队提供帮助，在比赛圈子中建立友好的良性的氛围。本战队也将坚持创新理念，做好机构的设计和优化，继续追求创新和极致。

1.4 参考文献 (5)

- [1]李佑晗.基于麦克纳姆轮移动平台的振动优化技术研究[J].汽车工艺师,2020(10):48-51,54.
- [2]卢浩文, 谢佳洽, 李泽寰, 等. 基于三维软件的麦克纳姆轮移动平台悬架系统研究[J]. 数字技术与应用, 2016,11:39-42.
- [3]周雨青, 叶兆宁, 吴宗汉. 球类运动中空气阻力的计算和分析[J]. 物理与工程, 2002,12(1):55-59.
- [4]赵清锋. 斜面上抛体运动中位置速度关系的讨论[J]. 物理教学,2021,43(6):42-44.
- [5]钱林方. 火炮弹道学(第二版)[M]. 北京理工大学出版社, 2016.
- [6]董海东, 王晓芳. V型块定位误差的分析与计算[J]. 中国工程机械学报, 2007,5(4):440-446.
- [7]刘守勇. 机械制造工艺与机床夹具[M]. 机械工业出版社, 1994.
- [8]吕继兵, 朱建军, 伍雅晴. 基于单位四元数的三维空间坐标转换直接解法[J]. 资源信息与工程, 2017,32(2):94-98.
- [9]高雄,胡侨乐,马颜雪,等不同结构厚截面三维机织碳纤维复合材料的弯曲性能对比[J].纺织学报,2017,38(9):66-71.
- [10]庄蔚敏,王楠,吴迪,等.碳纤维复合材料层合板三点弯曲损伤仿真研究[J].机械工程学报,2019,55(10):109-114.