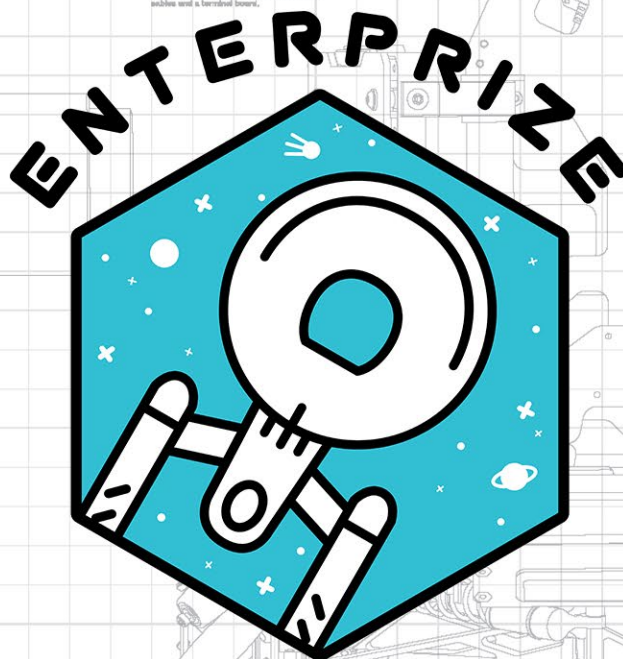




Using a 55-56 motor driver chip and
Pulse-Width Modulation (PWM), the
RoboMaster C200 Brushless DC Motor Speed
Controller enables precise control over motor
torque.

Exclusively designed for the RoboMaster
M200S P18 Brushless DC motor and
C200 Brushless DC Motor-Speed Controller,
the M200S Armature (A2) includes several
sensors and a thermal sensor.

The M200S Armature (A2) includes several
sensors and a thermal sensor, ensuring a
complete and accurate system for your
RoboMaster robot.



The Hong Kong University of
Science and Technology

ROBOMASTER 机甲大师超级对抗赛 技术方案

撰写人:

佟哲

香港科技大学 22 级本科

计算机工程专业

ENTERPRIZE 战队 23 赛季机械、宣传

24 赛季队长、机械、宣传、财务

联系微信:

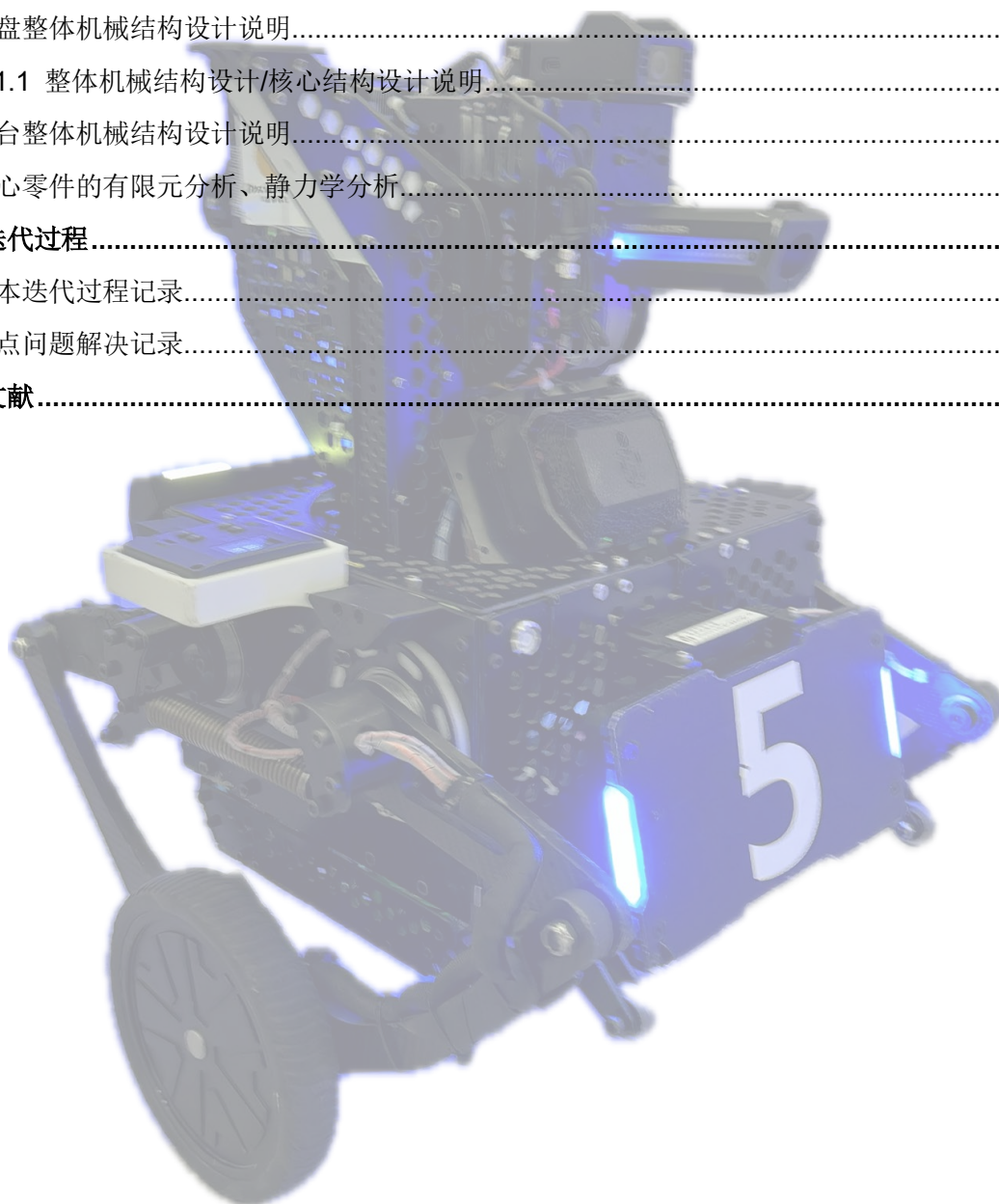
TZ13066602624

联系邮箱:

ztongae@connect.ust.hk

目录

1. 概述.....	3
1.1 背景&目标.....	3
1.2 机器人功能定义.....	3
1.3 机器人核心参数.....	4
2. 机械结构设计方案.....	6
2.1 底盘整体机械结构设计说明.....	7
2.1.1 整体机械结构设计/核心结构设计说明.....	7
2.2 云台整体机械结构设计说明.....	14
2.3 核心零件的有限元分析、静力学分析.....	17
3. 研发迭代过程.....	18
3.1 版本迭代过程记录.....	18
3.2 重点问题解决记录.....	18
4. 参考文献.....	19



1. 概述

1.1 背景&目标

平衡步兵，作为步兵的一种子类别，最早在 2019 赛季的官方文档中首次出现。顾名思义，这种步兵车辆以平衡车为底盘，各支队伍可以在腿部结构、车轮选择以及平衡算法上展示自己的技术优势。然而，由于之前研发成本高，且缺乏实际比赛中的参考战绩，大多数队伍一直处于观望状态。直到 2022 赛季的各个区域赛上，平衡步兵凭借其辉煌的战绩给人们留下了深刻印象，许多队伍才开始投入到平衡步兵的研发中。

与普通步兵相比，平衡步兵具有显著优势。其独特的前后两块大装甲板让对手在平衡侧身时难以找到攻击点。同时，若配备设计合理的双自由度轮腿，平衡步兵可以具备普通步兵难以达到的弹跳能力，轻松跳上台阶，实现其他机器人无法实现的。这对传统战术方法产生了巨大的冲击和扩展，使得战术选择更加多样化。

总的来说，平衡步兵的加入，将极大提升战队的战斗能力，并丰富战术打法。尽管研发需要投入大量资源，但依然值得投入。

本开源文档将主要介绍香港科技大学 2024 赛季开发的平衡步兵的机械结构设计，这款平衡步兵是在 2023 赛季的基础上进行改进和迭代而来的。

1.2 机器人功能定义

- 底盘功能设计
 - 在规则限制下尽可能扩大腿活动范围
 - 具有重力补偿
 - 拉簧补偿
 - 可以实现飞坡
 - 不易腿触底倾倒
 - 大轮配合细腿，增大接触角
- 云台设计
 - 超过 400 发容量弹舱，联盟赛、对抗赛全程战斗无需回补给点
 - Pitch 惯量小，使控制更加灵敏
 - 电控、算法相关硬件（NUC、STM32 开发板、相机、线材等）拆卸方便，便于维护
- 射击系统
 - 实现不卡蛋稳定 20Hz 供弹机构
 - 带视觉的辅助瞄准
 - 散布小，15m 远可稳定击中小装甲板

- 其他功能
 - 便于维护
 - 小模块损坏 3 分钟内可修复/替换
 - 大模块损坏 10 分钟内可修复/替换
 - 强度高，能在平衡步兵暴力调试中保持完好
 - 整体外形美观
 - 成本低，尽量不使用碳纤维板、CNC 件

1.3 机器人核心参数

名称	参数
重量、重心	21.8kg
尺寸（延展尺寸，长 x 宽 x 高）	445x445x780mm
主要传感器型号、参数、数量	IMU: ICM-42688P 两个（云台、底盘各一） CV 相机：海康威视 CA-016-UC
供电电压、所有电容总容量、工作时电压范围	使用 TB 系列电池 工作电压范围：24V-16V（极限状况） 电容容量：1900J （底盘仅轮子）静止功耗：6-7W （底盘仅轮子）峰值功耗：200W
用途与数量说明	五连杆底盘设计： 关节电机：HT-04 轮毂电机：本末科技 M1505B_111 串联腿底盘设计： 关节电机：本末科技 P1010B-111 减速电机 轮毂电机：本末科技 M1505A_222 云台：

	Yaw、Pitch: GM6020 供弹: M2006 发机: M3508 x2 弹舱盖: M2006 (可替换为舵机)
机器人其它核心性能参数	平地速度实测最高可达 3.5m/s 35 度坡速度可达 1m/s 17 度坡飞坡速度可达 2.5m/s 可驻坡 可飞坡 可任意角度摔倒自救 (不包括侧倾)

2. 机械结构设计方案

在 2023 赛季平衡底盘调试中，我们经常会遇到关节电机电流过大、发热严重、关节电机固定螺丝易断裂的问题。通过分析，我们得出以下简单结论：

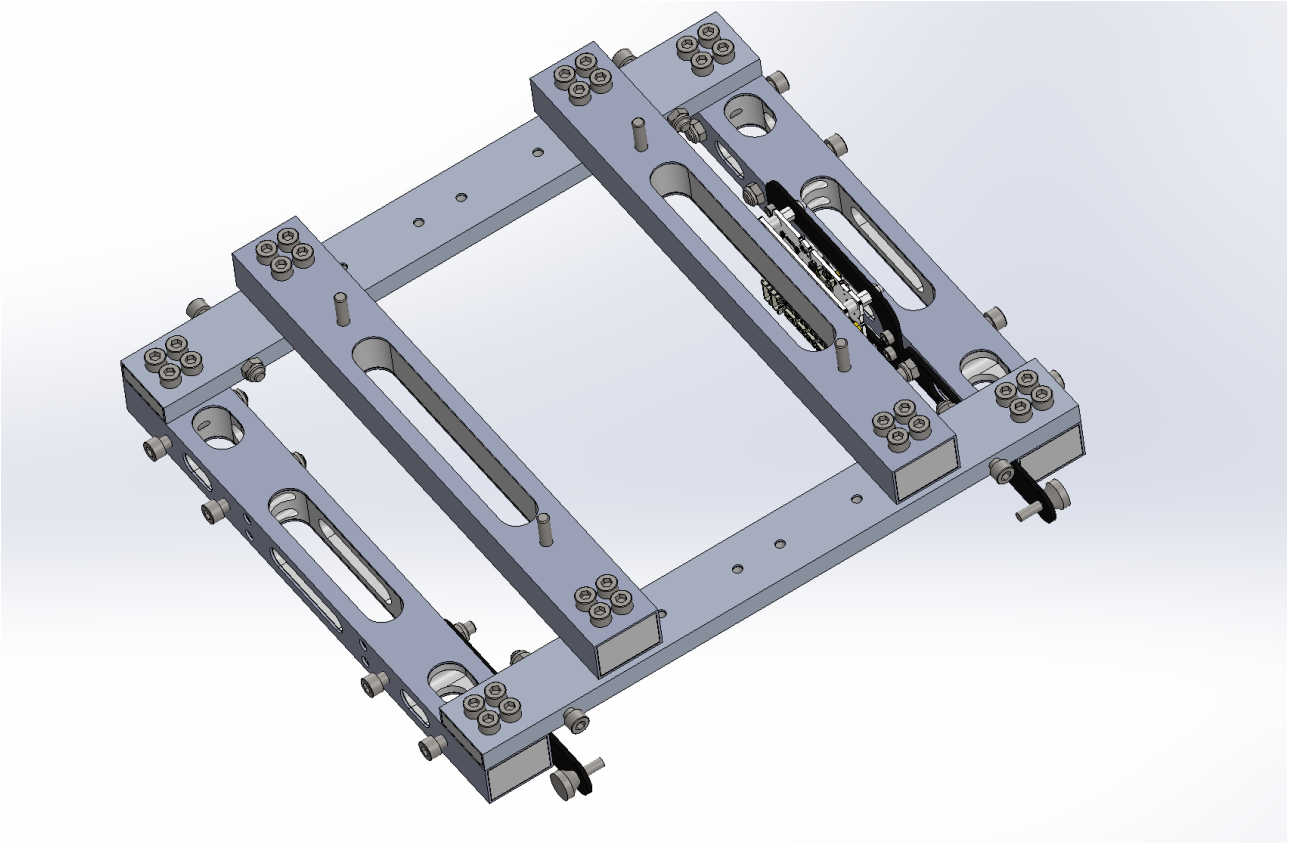
- 电机电流过大导致发热严重，不只是因为电机性能不足，同时也因为全车质量大，导致电机在各种工况下持续保持很大的负载（ $\sim 6-7N \cdot m$ ）。
- 车架、云台极易损坏。因为平衡步兵工况特殊，在调试以及比赛中经常会以各种角度重重摔在地上，因此：
 - 对整车所有部件强度均有很高的要求。
 - 对整车几乎所有部件都要求快速维修、更换。
- 平衡步兵为做到轻量化、高强度，会大量使用碳纤维板、CNC 件，造成成本超高，对于预算不充足的队伍是一个非常大的负担。

因此，一个能够平衡重力减轻关节电机负载的，高强度以及结构简单易维护的新平衡步兵成了我们的研发目标。

2.1 底盘整体机械结构设计说明

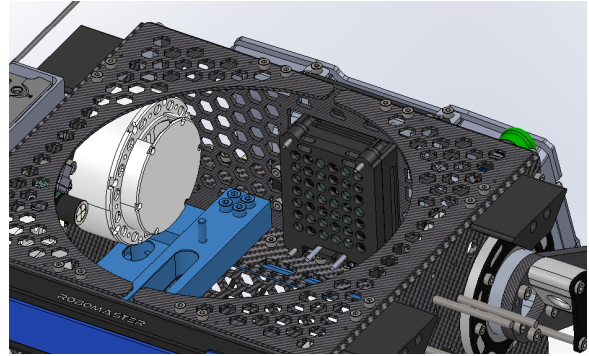
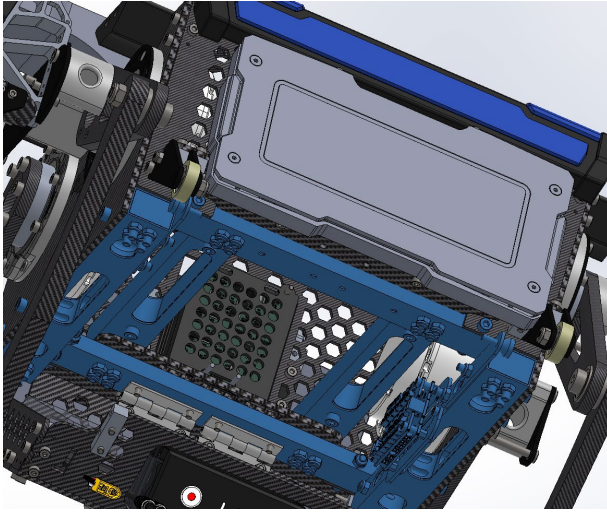
2.1.1 整体机械结构设计/核心结构设计说明

2.1.1.1 底盘整体



底盘铝方管框架如图所示。为兼顾重量与强度，所有铝方管厚度均为 1mm，且均有极低填充率的 3D 打印件填充。1mm 铝方管保证了基础的强度及较低的填充率，3D 件的主要作用为防止拧紧螺丝时铝方管产生形变，导致螺丝无法拧紧、铝方管产生形变。3D 件填充的设计灵感主要来自上海交通大学 2023 年的平衡步兵开源设计[1]，但其使用的大量 CNC 件填充成本极高。本方案使用的 3D 件虽然在强度上无法与铝合金 CNC 相比较，但是其加强作用足以应对大多数情况，如多次飞坡失败带来的摔打、翻滚等。

铝方管框架最外圈四根铝方管直接与玻纤板外壳相连，保证外壳受力直接传递到核心框架，增加强度并减少连接件数量。



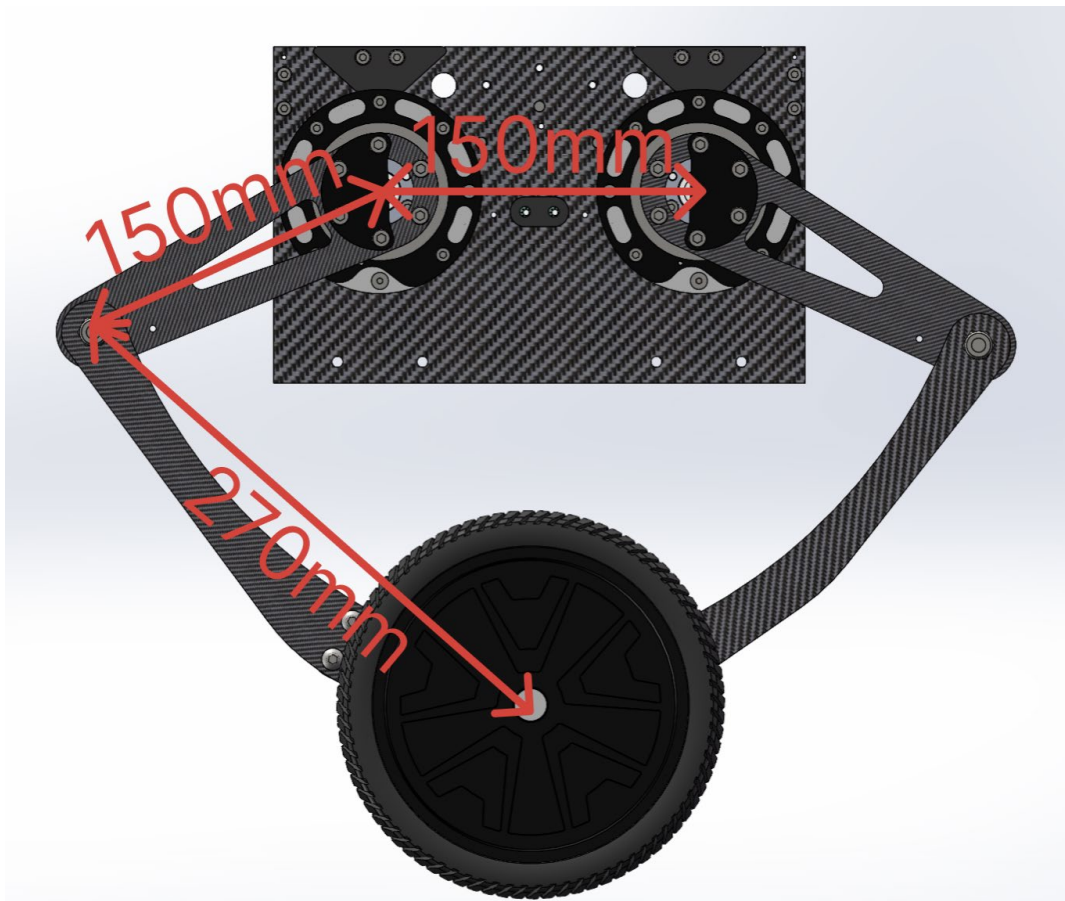
2.1.1.2 五连杆

五连杆长度如图所示：

关节电机轴距：150mm

大腿长：150mm

小腿长：270mm



限位是本设计的技术重点。限位最大作用是限制其站立高度，防止平衡步兵完全站起时的高度超过尺寸限制。

目前大多数学校的方案为在关节电机处设置限位，限制大腿上下转动角度。此方案虽然可以有效

限制最大延展尺寸，但是也牺牲了大量活动空间，使平衡步兵难以直接“蹭”上台阶。

本方案的设计采用关节限位（向上约 45° ，取决于安装误差与大腿形状）+根部限位的方案，在保证机器人可以通过检录的条件下增加了更大的转动角度，使得如下图所示的腿方位变为可能：



这种限位非常有利于平衡直接“蹭”上台阶。“蹭”上台阶相较于跳上台阶对于操作手对于时机的把握要求更低，更加稳定且不易翻车。具体效果见展示视频“蹭上台阶.mp4”。

关节处的大腿上限位采用 TPU 95A 打印件。柔软的 TPU 材料相较于其他坚硬的 3D 打印材料具有更强的抗冲击能力，几乎不会因为腿部大力撞击而产生塑性形变或者损坏。

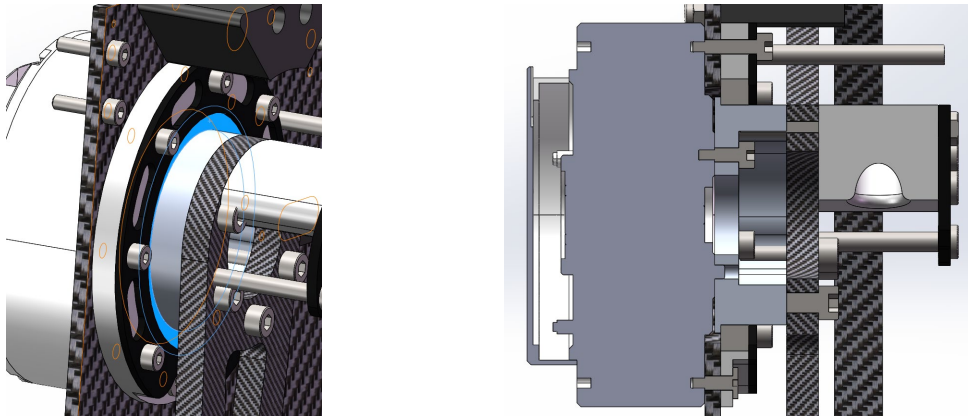
轮毂电机采用了本末科技的轮毂电机 M1505B_111。平地速度实测最高可达 3.5m/s ， 35° 度坡速度可达 1m/s ，可驻坡， 17° 度坡飞坡速度可达 2.5m/s 。

2.1.1.3 关节电机加强

在 2023 赛季我们使用的关节电机也是海泰 HT-04 电机，五连杆的大腿碳纤维板是直接固定在电机输出端上面的。由于电机输出端只有三根 $M4 \downarrow 5\text{mm}$ 螺纹和三根 4mm 销，腿和关节电机极易因为平衡跳跃、受到侧向冲击而损坏，发生“跳断腿”的现象。

在这个赛季我们参考了上海交通大学 2023 年的设计[1]，电机不直接连接大腿碳纤维板，而是通过套有大轴承的 CNC 件连接大腿。

左下图所示蓝色高亮部分即轴承。该轴承会承担关节处的轴向负载。大腿碳纤维板则通过 6 根 M5 螺丝与 CNC 件相连。

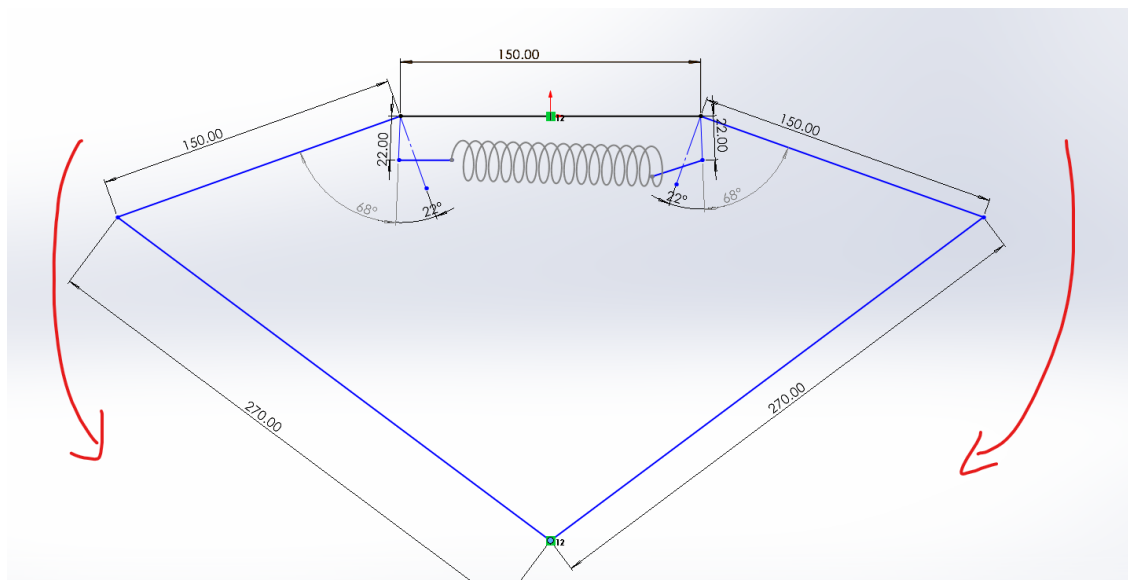


出于成本考虑，压住轴承外圈的设计使用了 3D 打印件垫高+玻纤板压住轴承的设计。但是在实际使用中，这种结构的强度仅仅是勉强够用，会有螺丝易松动的问题，长时间工作后会损伤 HT-04 外壳的螺纹。有条件的学校还是建议使铝合金 CNC 压住轴承外圈。

2.1.1.4 重力补偿

重力补偿是该方案的主要创新点。如上文所述，一台五连杆轮腿平衡步兵在静止站立时关节电机输出扭矩在 $6-7\text{N}\cdot\text{m}$ 左右（具体视整车重量、腿形状、站立高度而变化）。长时间持续输出大扭矩会使关节电机大量发热，电池续航严重缩短。由于减重需牺牲强度或者增加成本，我们择了成本低、无需牺牲结构强度的重力平衡方案。

重力补偿机构由每边一根拉簧及拉簧钩住的螺丝组成，其示意图如下：



拉簧会对弹簧钩住螺丝（下简称钩点）产生拉力，其效果表现为使腿向下登，抵消一部分重力，减轻关节电机的负载。

经过尝试各种数据，我们发现一种重力补偿效果明显、对弹簧伸长倍数、劲度系数要求在合理范围内的数据（五连杆长度如图所示）：

- 钩点距离关节中心的距离为 22mm
- 钩点与关节中心连线与大腿的夹角为 68°

- 弹簧进度系数 4000N/m

下图（使用 Geogebra 绘制，“重力平衡 Geogebra 计算.ggb”项目文件拖入 Geogebra 网页端即可使用）为一个 25kg 的平衡步兵以不同高度静止站立时，关节电机扭矩（单位： $\text{N}\cdot\text{m}$ ）与大腿角度（单位： rad ）的关系：

横轴：大腿与水平面夹角（顺时针为正）

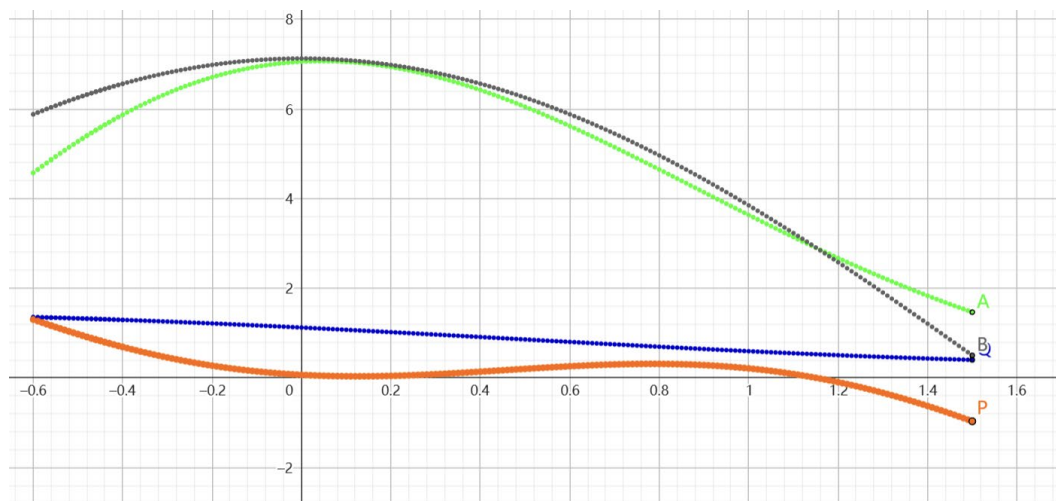
纵轴：扭矩（蓝色线：伸长倍率）

灰色线：无重力补偿时每个关节电机的扭矩输出

绿色线：弹簧拉伸产生的扭矩

橙色线：有弹簧进行重力补偿时每个关节电机的扭矩输出（即灰色线减去绿色线）

（非扭矩）蓝色线：此角度下弹簧的伸长倍数

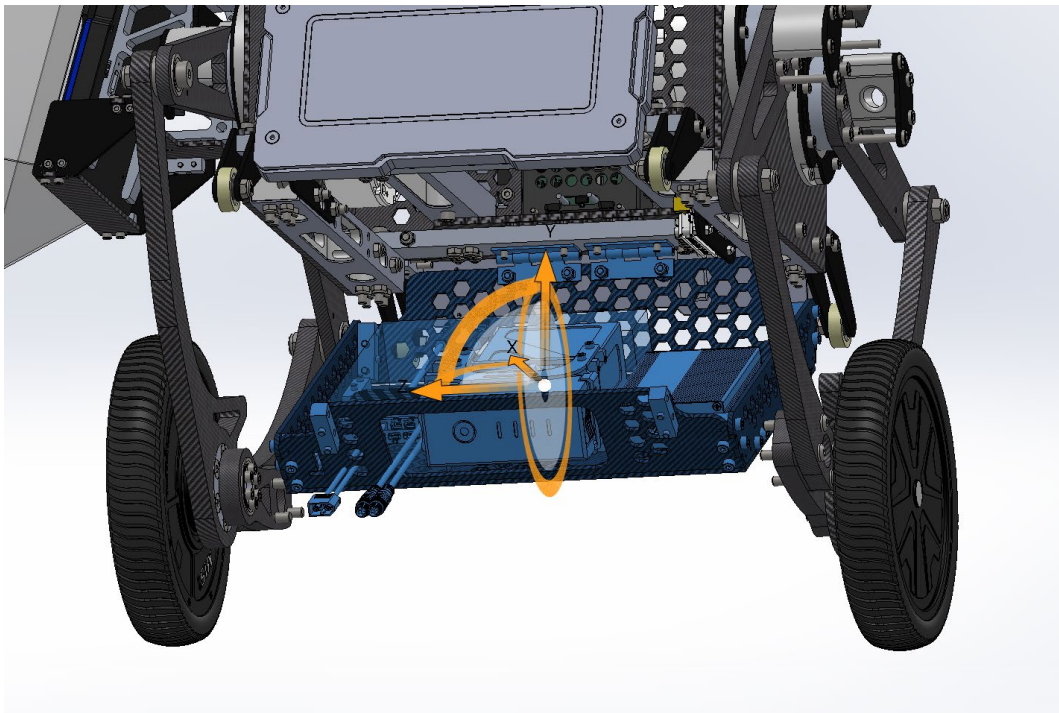


通过图表可见，原本需要 $2\sim 7\text{N}\cdot\text{m}$ 才能站立的平衡步兵在经过重力补偿后仅需 $\pm 1\text{N}\cdot\text{m}$ 左右就可以实现站立。

在实际表现中，我们发现平衡步兵行走的续航时间延长为原来的二倍左右，电机发热情况得到了明显缓解。

在电控实现中，仅需获得两个关节电机的角度就可以计算出弹簧产生的扭矩，直接减去即可，不影响其他调试。

2.1.1.5 走线“肚兜”（如图蓝色部分所示）



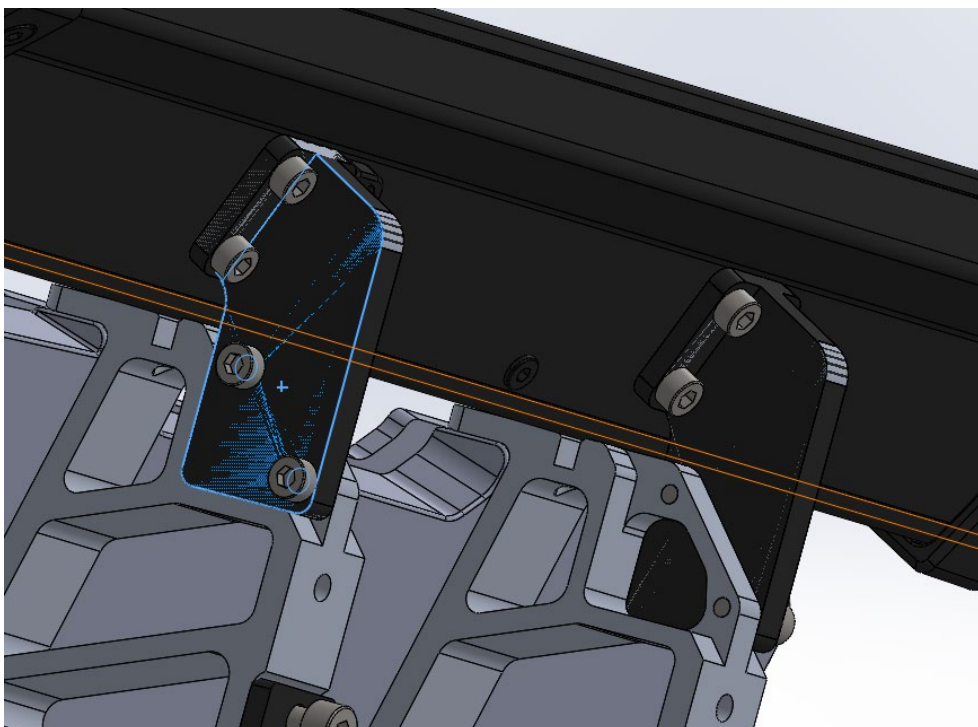
走线“肚兜”是我们 2023 赛季平衡步兵就已有的设计。肚兜仅需拧开两颗 M4 手拧螺丝即可打开，打开后即可对包含了大部分底盘硬件的电源、云台下方进行维护，非常方便。

肚兜底部固定了场地交互模块，拆下电池后即可快速更换。由于肚兜在底盘铝方管的基础上向下延申了 6cm，场地交互模块距地面更近，更容易扫描到场地中的 RFID。

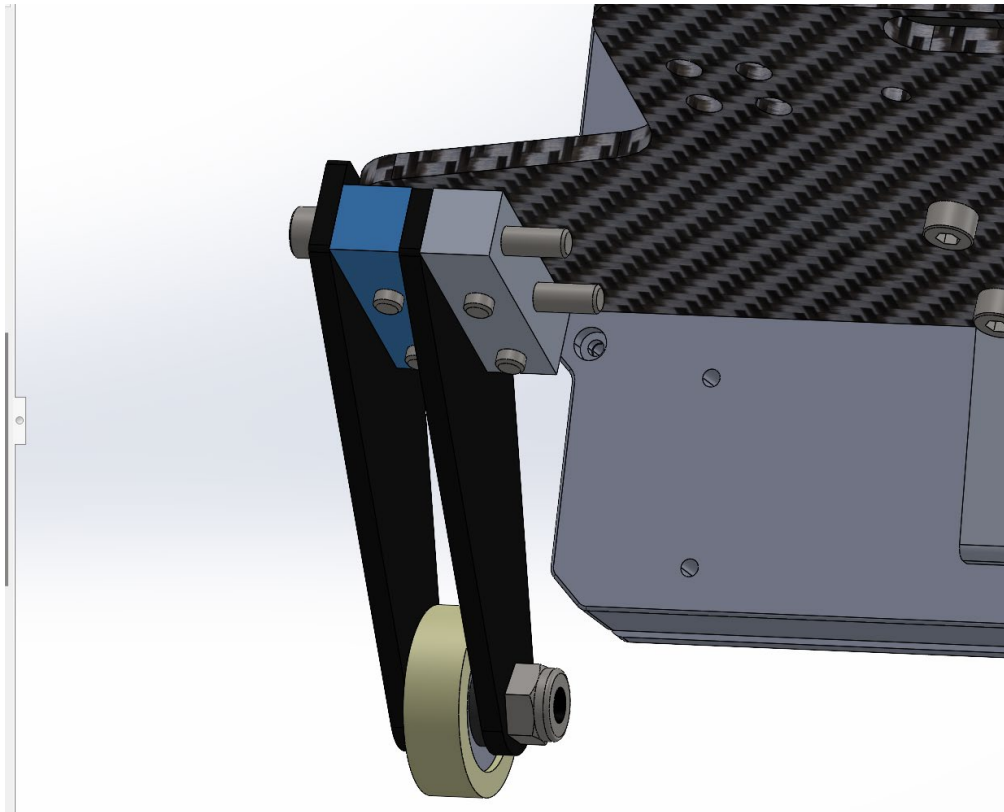
在设计平衡步兵的肚兜时需注意平衡步兵在断电倾倒时，场地交互模块以及肚兜转角是否会摩擦地面，以免对肚兜施加过大负载。

2.1.1.6 底盘其他细节：

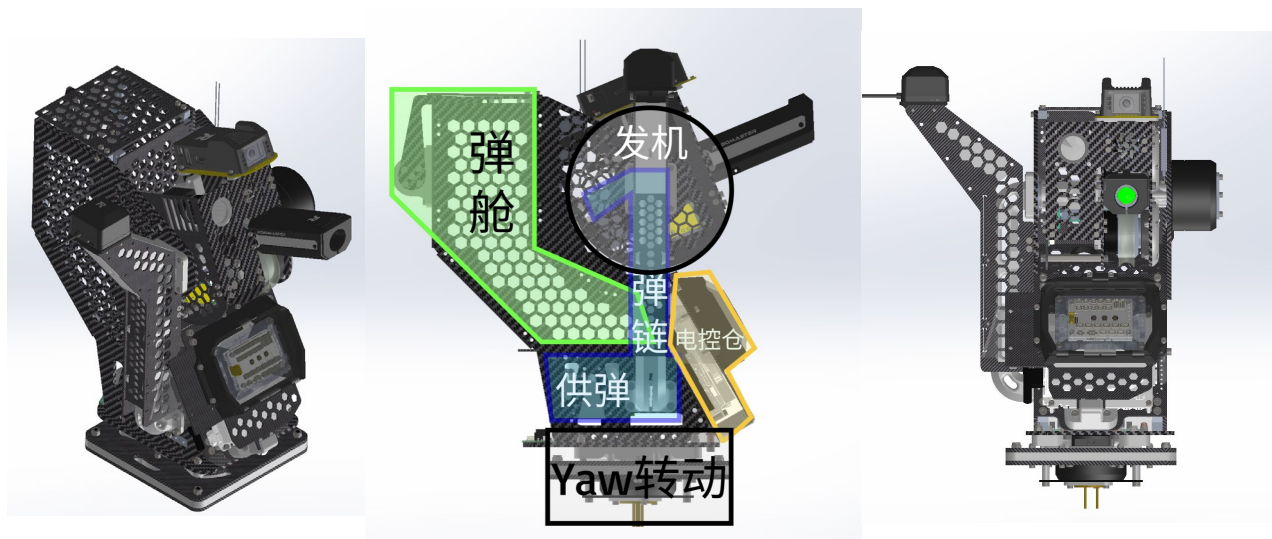
- i. 灯条模块使用了改变形状后的 TPU 打印的支架，防止断裂，并给后方让出空间。



- ii. 导轮连接：蓝色选中的长方形角件横向 M4 螺纹需要自行扩成 4mm 通孔，螺丝只拧入右侧未选中的长方形角件；导轮只与有一定弯折能力的 4mm 玻纤板连接，不直接连接铝方管，防止在剧烈碰撞中使铝方管产生塑性形变乃至折断。



2.2 云台整体机械结构设计说明



云台功能分区如上图所示。本云台延续了 2023 普通步兵云台的优秀设计，尽量保持了高空间利用率的同时简化了结构，增强强度，提高可维护性。

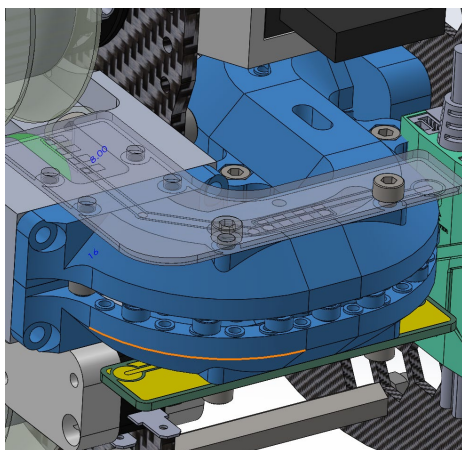
图示发机、电控仓、弹链、供弹四个部分均可通过拧下螺丝头暴露在外部的螺丝取下。

Yaw 供弹云台的需求来自 2023，2024 赛季规则允许远程兑换发弹量，因此我们需要一个容弹量更大的云台。考虑到兼容不同类型的底盘需要缩小 yaw 根部的半径，自瞄需要转动惯量较小的，弹仓选择放置在 YAW 轴和 PITCH 轴之间，整个云台的构型也就差不多确定了。

2.2.1.1 云台 Yaw（供弹机构及弹链）

供弹机构：

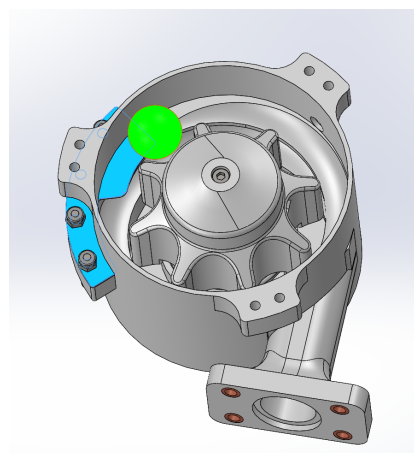
此供弹机构由 2023 赛季的拨弹盘发展而来，其核心亮点是左图蓝色高亮的 0.8mm 钢片。钢片可以有效加固拨弹盘，使拨弹盘在高速工作时不卡蛋、不损坏。



弹链：

弹链同样延续了 2023 赛季普通步兵云台的弹链，整体由 3D 打印件组成，经测试 PETG，PLA，ABS 均有不错的表现。经测试，在弹链转角处我们弹链转角半径设置为 17mm 时有最好的表现。弹链转角处我们采用了 MR52ZZ 轴承搭配 D2x10mm 销固定在 3D 件中。整体测试下来弹链表现非常丝滑，基本没有出现过卡弹的问题。

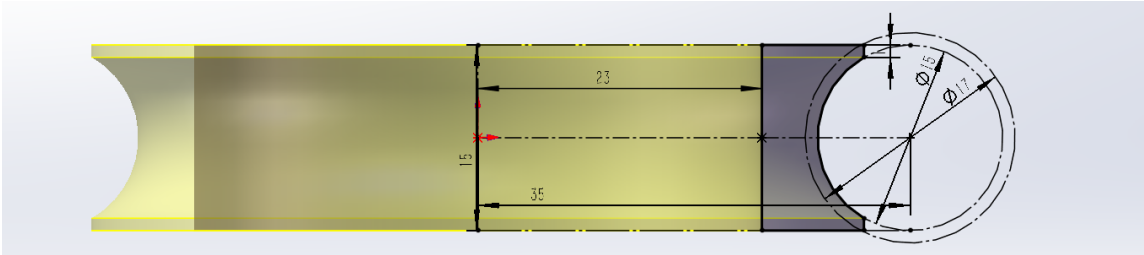
3D 件上条形槽是为方便观察弹链中的弹量。



2.2.1.2 云台 Pitch（发机）

发机延续了 2023 赛季普通步兵云台的发机，对中央的 CNC 件做了优化，使其能容下充能模块，便于与其他部件固定，并且更加易于制造，降低成本（嘉立创 CNC ¥419.36 两件）。摩擦轮完全延续了 23 赛季的弧形摩擦轮的设计，保留了轴承加强的做法。

a. 摩擦轮

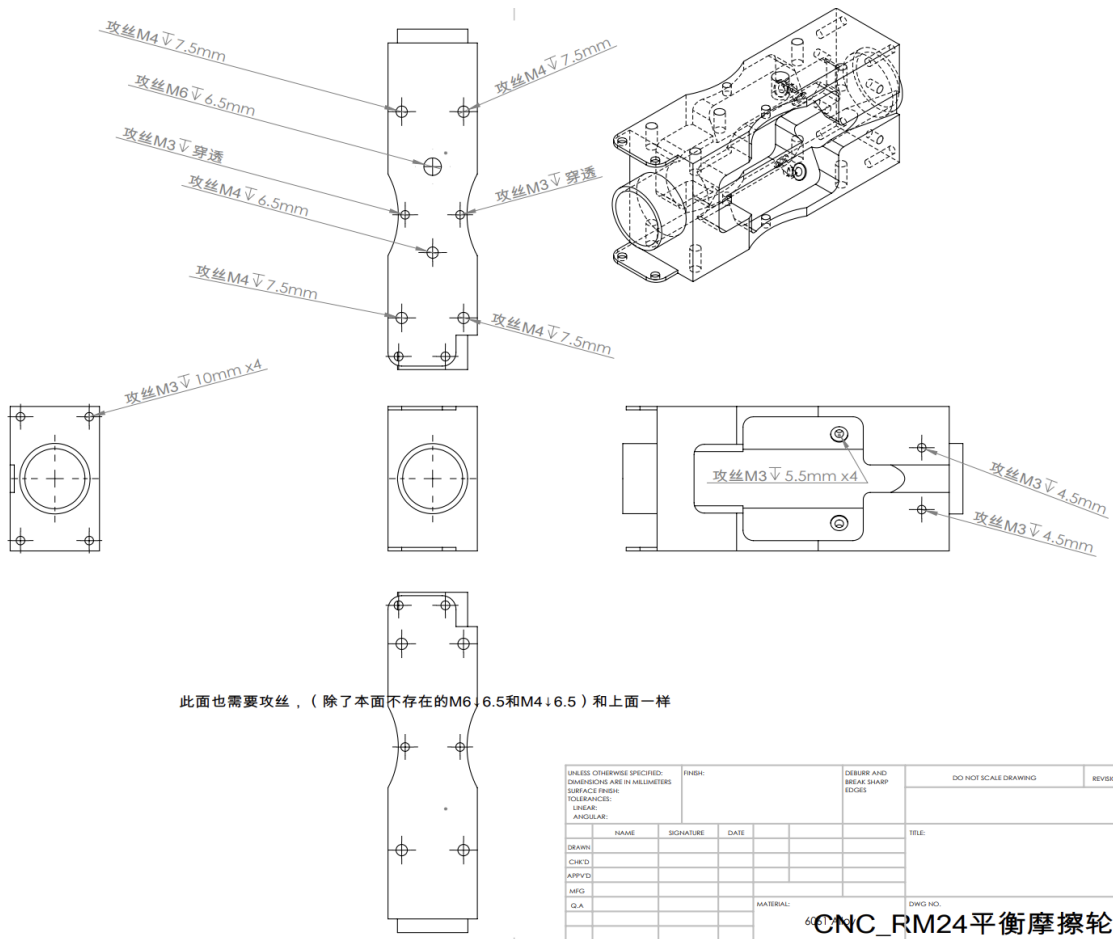
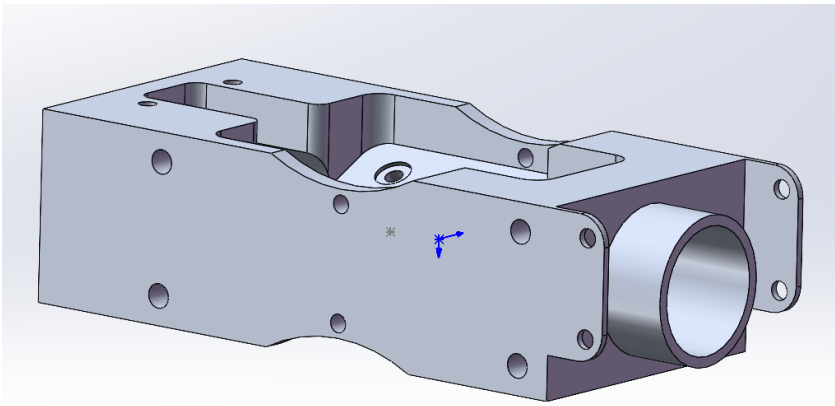


间距：70mm

压缩量：两边各 1mm

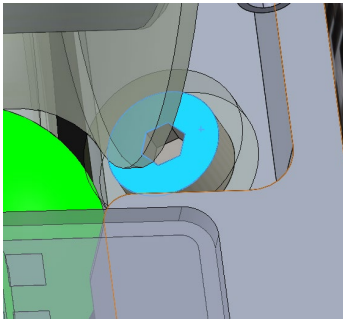
硬度：

b. 中心 CNC 件

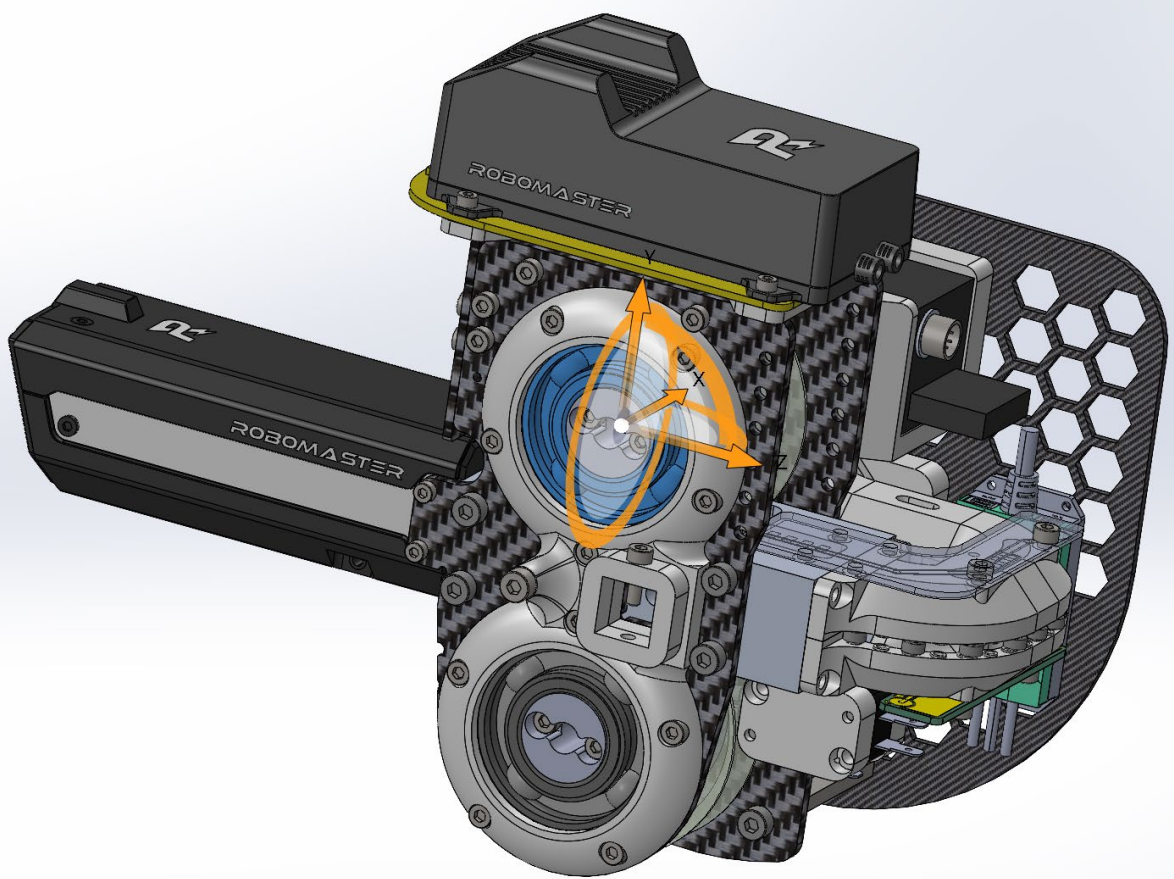


中心的 CNC 件保证整个发机精度，相较于 3D 打印，CNC 的精度更高，经过长时间使用后不易变形。

在这里使用了带外螺纹的包胶轴承，直径 10mm，两个轴承外沿最小间距 16.6mm，可有效限制 17mm 小弹丸（ $16.8\text{mm} \pm 0.2\text{mm}$ ）的位置。



c. 轴承加强



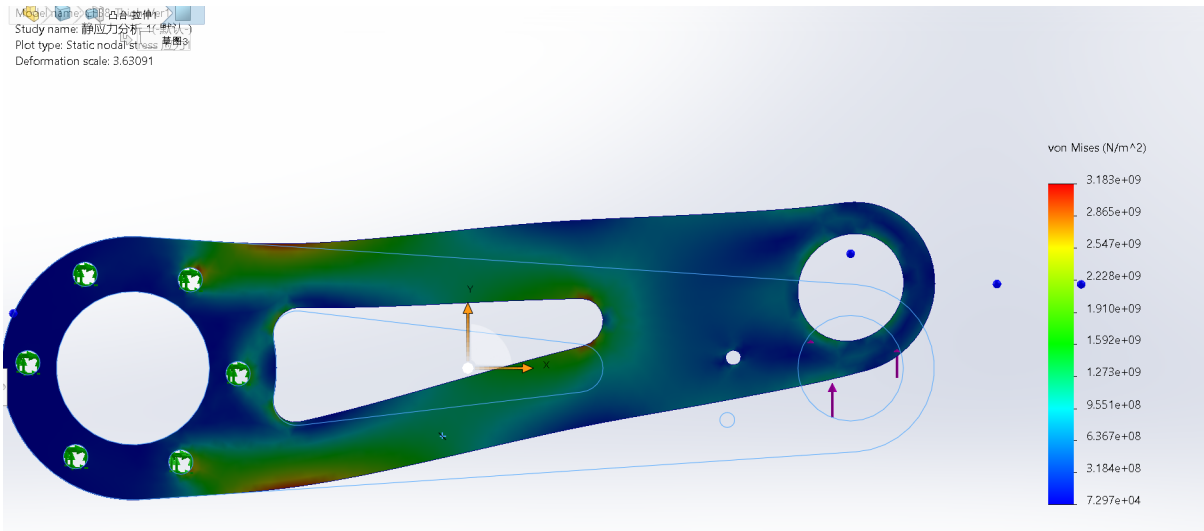
上图蓝色选中的零件是加强用轴承，由于 3508 转速很高，使用这种尺寸的轴承必须选用高质量进口轴承（我们使用的是 SKF 6204ZZ），否则极易发热、损坏。

在组装时要注意，不能依靠 3D 件卡住轴承，要使用圆柱固持胶来固定轴承外沿和板材，防止长时间使用后板材、3D 件磨损。

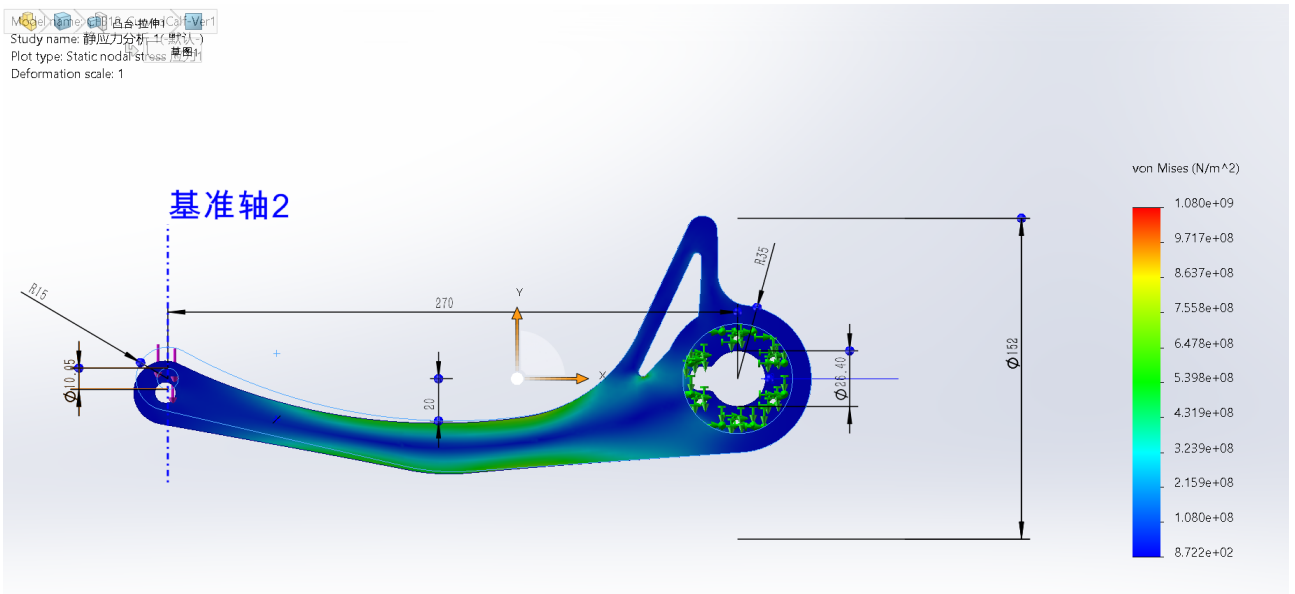
在实践中我们发现，此处的轴承完全可以换用内径外径更小的轴承，以减小对于轴承的线速度要求。

2.3 核心零件的有限元分析、静力学分析

8mm 3K 碳纤维板大腿：模拟最大载荷 50000N（5000kg，约 100 倍于正常使用载荷）



12mm 3K 碳纤维板小腿：模拟最大载荷 5000N（500kg，约 10 倍于正常使用载荷）



3. 研发迭代过程

3.1 版本迭代过程记录

V1.0 包含许多持续小更新，图纸即是最新版本 V1.0

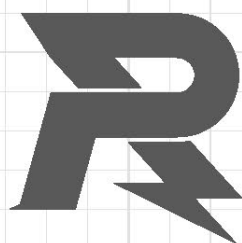
版本号或阶段	功能或性能详细说明	完成时间
V0.0	仅包含底盘，供电控测试控制代码用	2024.4
V1.0	完整版，上场参赛	2024.7

3.2 重点问题解决记录

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
1	在经历碰撞后导轮固定板会断裂	导轮固定板减重孔导致强度不足	取消减重孔	初代技术验证底盘
2	在摔落后云台 UWB 支架会断裂	UWB 支架板材缺乏填充，会产生平行四边形形变	在中间填充 3D 打印件	V1.0 正式车
3	在高处摔落后腿部轴承会损坏	轴承小，载荷不能太高	换用厚度更厚，载荷更强的轴承	初代技术验证底盘
4	供弹机构卡住	掉入扎带头，且 2006 电机周围有线材在摩擦电机	取出扎带头，在供弹盘上方加胶带防止异物掉入	V1.0 正式车
5	弹舱盖损坏	3D 件强度不足	换用铝合金角件	V1.0 正式车
6	Pitch 限位损坏	3D 件强度不足	更改设计，使用螺丝头限位	V1.0 正式车

4. 参考文献

- [1] Aeroman66, “【RM2023-平衡步兵机械结构开源】上海交通大学-云汉交龙【RoboMaster论坛-科技宅天堂】,” *RoboMaster*, Sep. 20, 2023.
<https://bbs.robomaster.com/forum.php?mod=viewthread&tid=22803> (accessed Jul. 26, 2024).



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街道仙茶路与兴科路交叉口大疆天空之城T2 22F