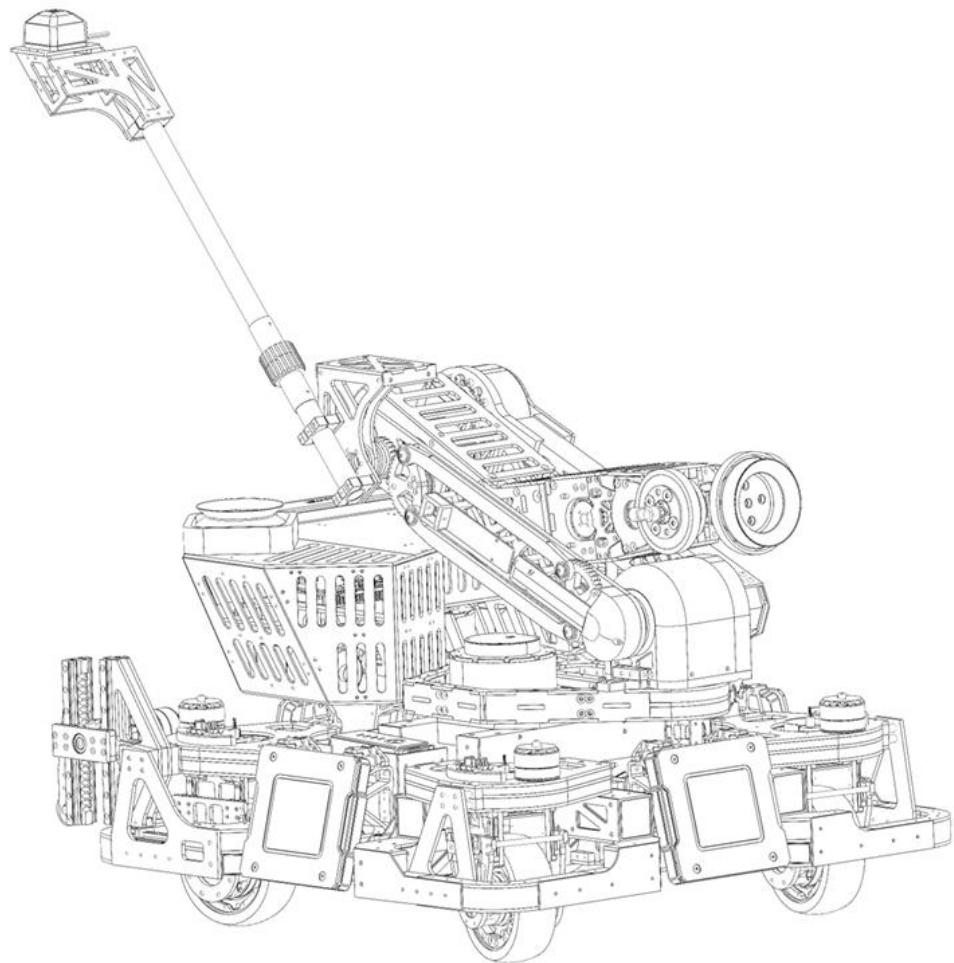


RoboMaster2025 赛季香港科技大学  
ENTERPRIZE 战队  
轮式六轴机械臂工程机器人  
结构部分说明文档



# 摘要

2025 赛季香港科技大学 ENTERPRIZE 战队所研发的第一代主力机械臂工程机器人，设计目标是实现高效的取兑矿能力和探索多功能工程的可能性。本文主要介绍机械研发思路及部分结构设计。

# 目录

<b>第一章 工程结构设计简述 .....</b>	<b>3</b>
1.1 核心设计理念 .....	3
1.2 设计目标即实际效果 .....	4
1.3 机器人核心参数 .....	5
<b>第二章 设计方案 .....</b>	<b>6</b>
2.-1 写在前面 .....	6
2.0 设计理念 .....	6
2.1 底盘 .....	7
2.2 J0&J1&云台 .....	9
2.3 J2&L2&J3 .....	12
2.4 L3 .....	13
2.5 Wrist .....	14
2.6 限位、uwb 及走线方案 .....	15
2.7 抬升机构 .....	17
2.8 改装 3508 泵 .....	18
2.9 自定义控制器 .....	19
<b>第三章 反思与展望 .....</b>	<b>19</b>

# 第一章 工程结构设计简述

## 1.1 核心设计理念

笔者总结设计大臂工程有以下几条核心设计理念：

- (1) 结构简洁，强度刚度及稳定性高
- (2) 机械臂工作空间大，臂尽可能长，尽量减少关节限位
- (3) 模块化程度高，易于改进维护
- (4) 符合操作手习惯的图传视野和自定义控制器

这是笔者认为设计一台大臂工程时最重要的部分，故将其放在最前面。下面是笔者对大臂工程的理解：

首先，何为大臂工程？为什么要设计大臂工程？

笔者定义的大臂工程是取矿及兑矿全部仅依靠一副串联六轴机械臂的工程机器人，区别于龙门架工程，以及小臂工程。笔者定义的小臂工程主要有两类：scara 机械臂工程和一键三金机械臂工程。

大臂工程是所用构型中结构最简单的，其核心优势在于拥有所有构型中最大的工作空间自由度和最好的结构刚性。因此大臂工程应当**功能最丰富的工程机器人**。除取兑矿外，它能完成翻到自救、救援翻车队友、投掷矿石等进阶功能。大臂工程也应当是兑换速度最快的工程构型。

设计大臂工程就是要将构型优势完全发挥出来，即笔者总结的核心设计理念。接下来是对设计理念的展开说明。

- (1) 结构简洁：结构简单才能带来高强度高刚度，简单来讲就是力大砖飞，力大时完成各种功能的基础。另一方面在设计一些特殊结构时尽量让它“融合”在大臂上，避免为了单一功能设计特种结构，避免影响大臂的结构强度和妨碍工作空间。
- (2) 工作空间大：某种意义上讲规则允许范围内机械臂越长越好，各个关节没有限位最好，几乎所有功能都是臂越长越灵活性能越好。
- (3) 模块化程度高：客观上讲这个是为了减少迭代和维护所需要的人力资源，大臂工程结构本身就比较解耦，并且**大臂工程研发需要给软件充足的时间（越多越好，无上限）**，迭代维护尽量少占用时间。主观上就是别一体化设计折磨自己(一个人维护一台工程挺累)。
- (4) 符合操作手习惯的图传视野和自定义控制器：笔者和这台工程的电控兼操作手都认为，机械臂的上限是离不开手操的。本工程几乎所有的功能都是手操，并且操作手没经过多长时间的训练。可以说这台工程的优秀发挥很大程度上得益于符合操作手习惯的图传视野和自定义控制器。

总体而言大臂工程的细节设计难度和装配难度应该是所有构型中最低的，核心区分点就是对整体结构设计的理解。

以上是笔者个人对大臂工程的理解，可能有些抽象缺少细节，这是因为听说 26 赛季工程机器人机制会大改，估计 25 赛季的很多细节设计对今年没什么帮助。笔者希望写下的内容能够对 26 赛季的大臂工程设计有一些意义。

## 1.2 设计目标即实际效果

赛季初设计目标	实现效果	与目标的差距及部分原因
快速取矿，能从一侧掏到对侧金矿	操作手能够手操最快两秒钟取出矿石	图传与矿槽干涉没法掏到对侧矿，迭代中图传位置改变影响了初始的设计。不过后来发现在己方半场取矿和跑到对方半场取矿时间上是一样的，因此掏对侧矿意义不大。
在 20 秒内兑换 4 级矿	最快 5.8s，平均 10s 内兑换 4 级矿	
自带 2 存矿位置，一键存矿石 / 取矿石	存取矿石成功率只有 90%，场上有存第二矿时掉矿问题	动态负载的重复定位精度不够，两个存矿位共用同一泵导致存第二矿失败容易导致第一矿掉落
高机动性底盘，能够小陀螺	舵轮底盘，能够小陀螺取矿，目测机动性是工程里很好的，小陀螺多次极限逃生	
投掷矿石能力 (>=5m)	未能达到 5m 的距离，但在赛场上得效果足以将矿石扔下中央高地	臂的惯量太大导致全力投掷矿石时会翻车。Pitch 轴关节电机转速较慢，气阀放气时间不太稳定导致调试困难。最终未能有时间调出稳定投掷。手操投掷时有过投出超 5m 的记录
救援友方翻倒机器人	赛场上成功救援己方翻倒英雄机器人	操作手没有特意训练过，方法得当能够更快救援
5 秒内两级台阶的跨越能力，获取地形跨越增益	最快 10 秒从开始上台阶到完全登陆中央高地	登岛纯靠操作手手操实现，区域赛时发现登岛收益不高因此没有投入什么经历做自动化调试，另外稳定性也是个问题
赛季中补充设计目标及原因	实现效果	与目标的差距及部分原因
在高地上偷对面银矿石 发现臂可以够到	实战中成功偷走了对方一枚银矿石，不过有点容易翻车	
冲下台阶 冲下二级台阶可以更快返回基地 从公路区冲下一级台阶防止被车堵在 S 坡	只在场上测试了从公路区背着矿冲下一级台阶，成功，未掉矿。	在家没有场地测试，到了赛场由于没有备车不敢尝试冲二级台阶。另外感觉冲二级台阶翻车风险太高，老老实实走 S 坡比较稳定
翻到自救 场上还是有翻车风险的，尤其是机械臂工程重心有点高	操作手能够手操翻到自救	没时间做自动翻起

本车的设计思路和整个研发过程比较复杂(波折)，笔者认为这段不适合放在技术说明文档中。前文有对核心设计思路的总结，具体的研发思路过程将单独放在一个文档中(没必要特意去看，如果有兴趣可以当故事看)。

## 1.3 机器人核心参数

### 1.3.1 基础参数

整车质量 (包含裁判系统)	38kg
初始尺寸	590*590*540(mm)
最大伸展尺寸	1200*1200*1100(mm)有联动限位时 1400*1400*1200(mm)没有联动限位 由于 25 赛季国赛能够跨越地形的机器人是可以超尺寸的，因此本车上场时无联动限位
机械臂尺寸与各关节限位情况	大臂(L2)长 380mm 小臂(L3+L4)长 420mm J1: 360°限位 (旋转无死角，但不能超过一圈) J2: 无机械限位 J3: 无机械限位 J4: 360°自由旋转 J5: 无矿时约±120 限位 J6: 360°自由旋转
气动元件	两个 3508 自研改装泵、三个电磁阀、三个气压计、三个 80 风琴吸盘

### 1.3.2 机械臂电机选型

Joint	驱动电机	备注
J0、J1	LK-MG8016E V2 电机	比较稳定，在家调试从未出现问题。场上救车时 J1 电机有过掉电情况、场中发现电机进保护了，复现后推测是进欠压保护。复现情况是：电机大负载堵转，负载突然消失电机转速一下拉高导致掉电压。只要掌握正确的救车方式就不会出事。
J2、J3	LK-MG8010E V2 电机	伟大无需多言，标注峰值扭矩 40Nm 实测峰值扭矩超过 150Nm 没有它就没有这台工程
J4、J5、J6	LK-MG4010E V2 电机	虽然是双编但存在丢零点问题，可以换成 DM4310

## 第二章 设计方案

### 2.-1 写在前面

这台工程在设计之初大量参考了 [【RM2023-工程开源】上海交通大学-云汉交龙战队、](#) [【RM2024-工程机器人机械结构开源】上海交通大学-云汉交龙战队、](#) [【RM2024-工程机器人机械结构开源】中国石油大学（华东）-RPS 战队](#) 等开源报告，感谢各支战队与工程前辈们的帮助。出于尊重前辈和简化内容，上述开源报告中出现的技术点笔者不会再展开赘述。

笔者并非机械相关专业，在此之前也仅有三年的英雄机械设计经历，这台工程上的很多设计并没有进行严谨的理论计算，多是对前人的模仿或凭自己感觉设计。这台工程只有机械臂部分进行过一次完整迭代，其他部分基本停留于初版设计以及一些零碎的改进(改进的都是被玩坏了没法上场的部分)。很多地方并非最好的设计，笔者会指出自己知道有问题的地方，如果发现有笔者没提到的设计问题，欢迎与我交流。

还有一些地方的设计纯粹是出于省钱，本台工程总的研发费用大约是 1w2，如果除去研发时的损耗造价仅为 8k 左右（不包含赞助的关节电机及旧 3508）。本车上所有 CNC 均可铨洲。

### 2.0 设计理念

笔者设计本车心得总结出的核心设计理念已经写在前面了。这里是结合 25 赛季规则展开写一下笔者对于本车的设计理念和原因。

一台大臂工程必然以机械臂为核心设计，因此优先完成机械臂的设计。

机械臂使用经典 PUMA 构型，预设主要是找到一套优秀的连杆参数，优先考虑核心的取兑矿功能，然后再考虑其他预想功能能否在此基础上实现。连杆参数找对了，设计已经成功一半。

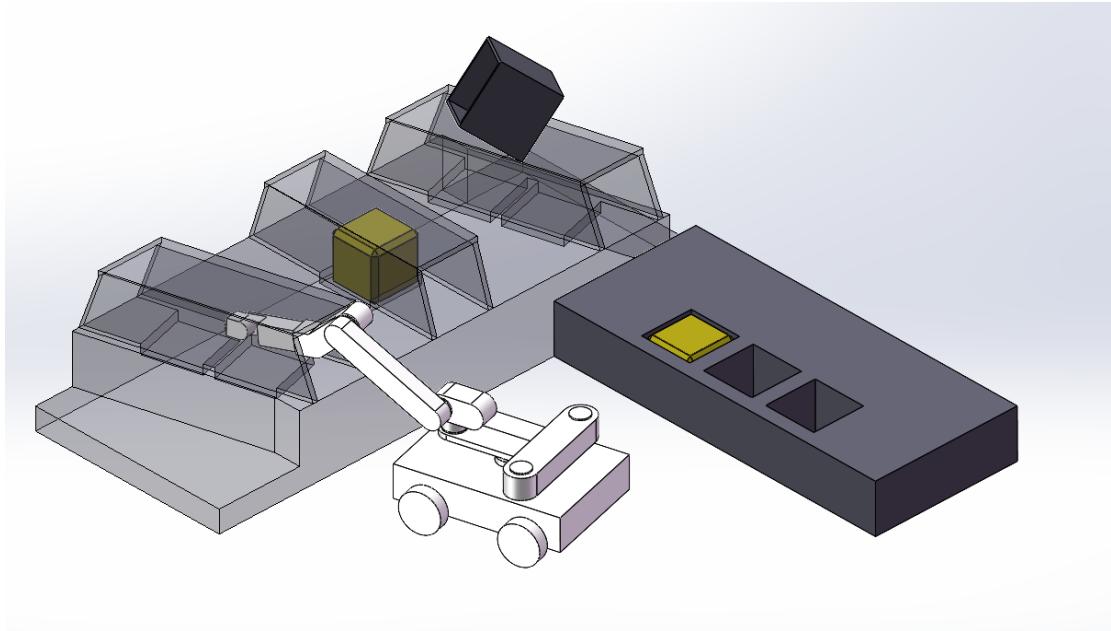


图 1 工程取兑矿预研模拟图

对于核心功能，即取金、取银和兑矿。笔者认为取银是最容易满足的，不需要过多考虑。兑矿需要的条件简单来说就是臂足够的长，这样才能使兑换时末端有充足的可用自由度。值得注意的是规则下极限兑矿位置已经接近工程的最大伸展尺寸，因此臂的长度上其实需要能够伸出最

大伸张尺寸才能做到灵活兑矿，再设计限位使之符合规则。另外，应该让“腕”尽量短来减少“回手掏”的难度。取金的难点则在于让臂能够伸进矿槽，笔者实操时发现这与兑矿设计存在一定矛盾，即臂越长，越难以伸进矿槽。在不改变臂总长的解决思路大致有：降低 J1 的高度，大臂短小臂长，小臂设计成 L 型等。

上述只是一些设计时的“感觉”。若想找到真正合适的连杆参数，笔者建议直接建模去试（如上图便是本车设计之初的参考）。连杆参数没有最优解，建模出的结果最为可靠。建模时除大小臂长这样可以灵活改变的参数外最好参考成车开源，避免画出“无法设计”的东西。

连杆参数确定以后，其他附加功能基本都可以靠增加关节自由度实现，本车设计时致力于“无限位”，即只要不违规就尽量避免车体自身限制机械臂的自由度。本车的特色功能机械臂上台阶也基于此得以实现(J1 需要转 180°，J2、J3 能够反折，小臂 L 型刚好避开一级台阶的角)。

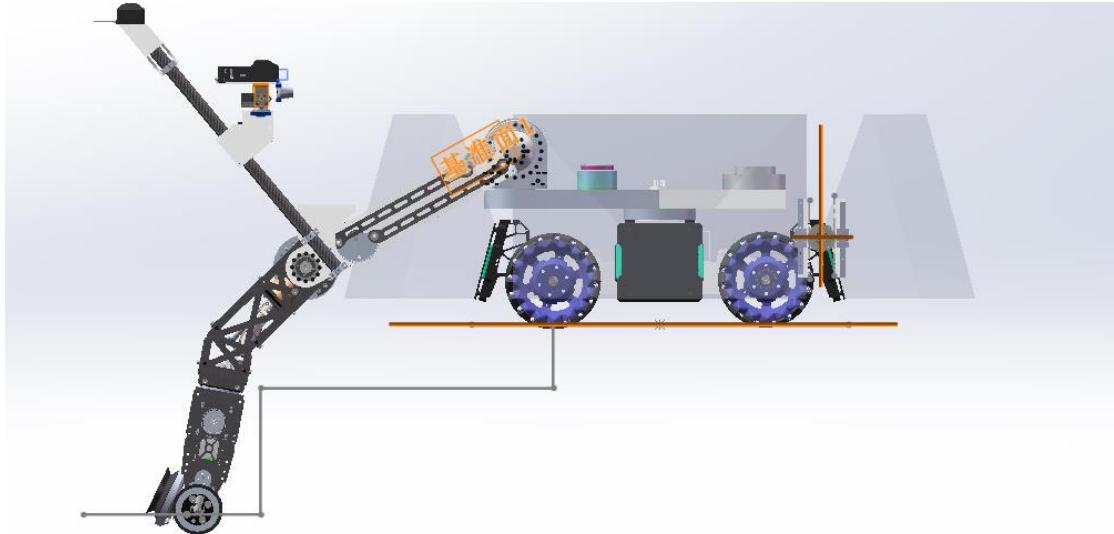


图 2 工程上台阶预研图

其他部分设计目标主要围绕机械臂展开，如底盘尽量低趴，云台扁而大，uwb 别挡机械臂等，再次不多赘述。

## 2.1 底盘

底盘框架采用传统的井字形框架，主要是为了方便装舵轮。另外由于这台工程的供电从原先置于底盘的两块 TB48 改为一块置于云台的 Matrice 4D(主因是队里健康 TB48 稀缺，并不十分推荐新电池)，因此在设计底盘时为了防止重心过高有故意增重(后来想抽死自己，差点超重了)。

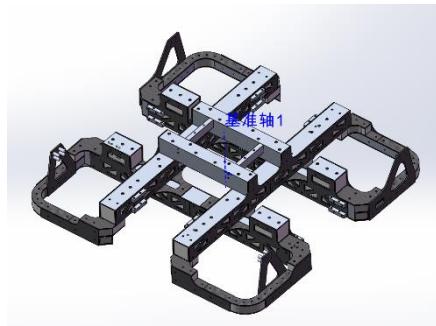


图 3 车架

### 2.1.1 舵轮组

这版舵组采用队内开发的 3508 自制减速箱以及 3508 光电门方案的舵上结构，详情请见 [【RM2025-面向铨洲智造设计的减速箱，全 CNC 舵轮组图纸开源】香港科技大学 ENTERPRIZE 战队](#)

这台工程最初的设计方案采用麦轮，后来为了充分利用工程不限功率的特点改为舵轮方案。这版舵轮组方案的设计目标是：不打滑、高载荷、易维护，并且高度低(避免云台干涉)。

胶轮采用电动滑板车 5 寸实心轮胎（某宝上 18 块一个），摩擦性能明显优于聚氨酯包胶轮，也比聚氨酯耐磨，使用一个赛季没有明显磨损。加速起来甚至可以“鬼火”，性能没得说。缺点是偏重、在官方地胶上有点过于摩擦了，导致软件参数要重调，谨慎选用。  
轮胎的固定方式时通过螺丝将两片“轮毂”夹紧轮胎，并不是包胶轮或打胶，这样的初衷是方便更换胎皮、但实际上根本不用更换。

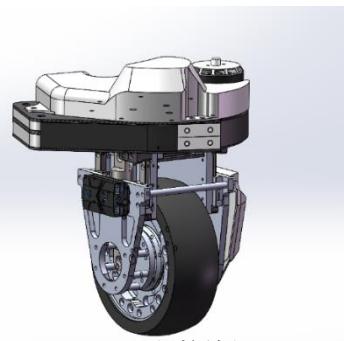


图 4 工程舵轮组

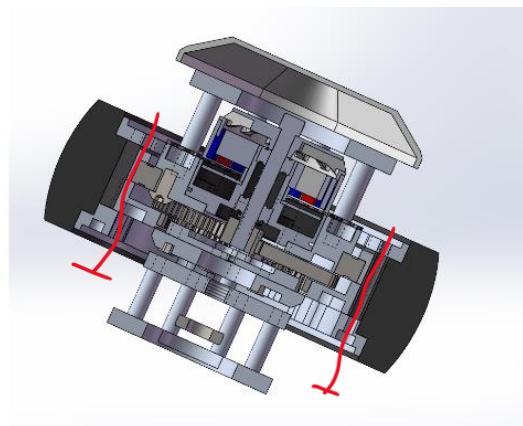


图 5 轮胎减速箱截面

悬挂采用舵下垂直悬挂，这是为了提高载荷与小陀螺稳定性。悬挂为了压缩体积用了长度 80mm，压力 20kg 的气弹簧，安装时需预压缩。值得一提的是使用 mgn7 滑轨两侧要用铝件夹住，否则三颗 m2 螺丝吃不住侧向力，原设计无铝件夹紧，多次冲台阶后螺丝断完。另外滑块一侧最好也应进行嵌入设计增加侧向强度，不过由于实测没出过问题并且开槽铨洲报价昂贵（其实应该可以减下来，太忙了没搞）所以未更改设计。

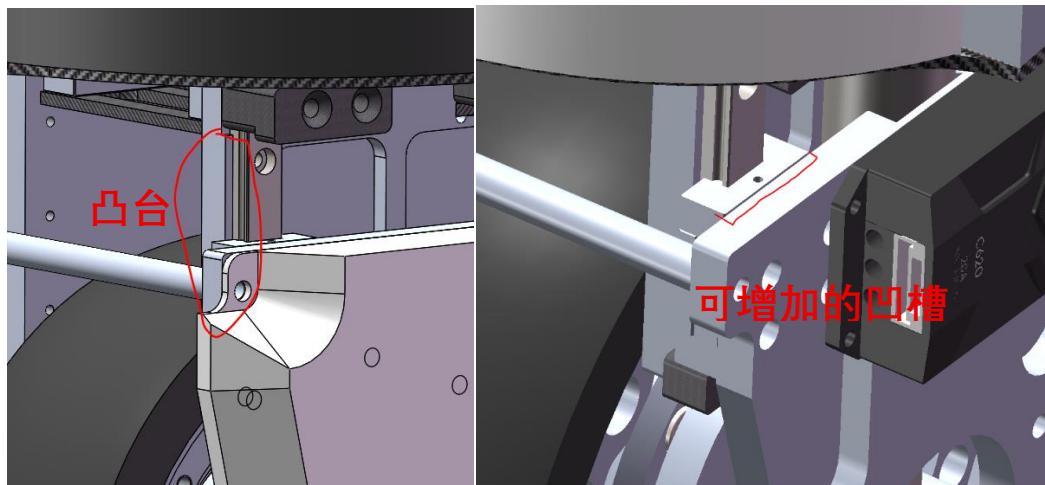


图 6 工程舵轮组悬挂滑轨

本设计中舵下线路大量裸露，不得已用 TPU 打印保护壳，但并不万无一失。这版舵轮单个舵组中 2kg，偏重。整体高度大约 300mm(含走线)，在保证悬挂行程的情况下基本做到了最矮。如果加速性能没有极致追求建议换回聚氨酯包胶轮，这样大约可以减到 1.7kg。

## 2.2 J0&J1&云台

### 2.2.1 J0

J0 设计时的主要目标就是结实而且能快拆。结构主要借鉴上海交通大学 24 赛季工程，采用大小滑环设计。不过本设计是内定外动，笔者认为这样的结构更利于快拆。只需先将链条拆除，再从云台上要拧下一圈螺丝，就可以将整个云台从底盘上拆下，并且除链条外不会掉下任何小零件，因此对维护十分友好，10 分钟内即可完成拆装。

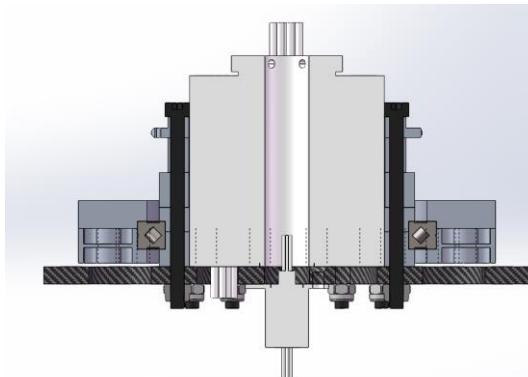


图 6 滑环截面

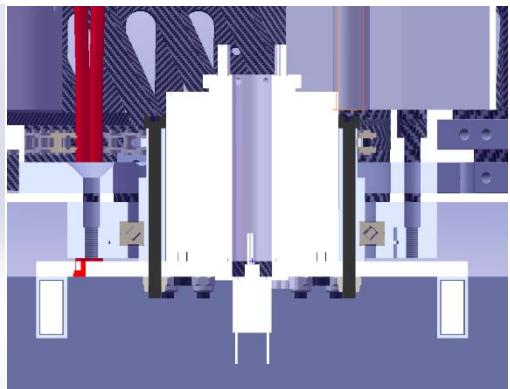


图 7 J0 截面

J0 使用 04c 工业链条，涨紧方式是最简单粗暴的用玻板顶死（需要反复试玻板长度，并且需要有一定技巧（力气）才能装上去），不过使用下来很有效。由于主动轮和从动轮都不是一体化机加件固定，中间经由很多零件连接，很难保证主动轮和从动轮的同心度、平行度。因此很吃装配技巧，稍微一点偏移就会导致松紧差异，笔者装过多次才勉强使链条转动时没有明显松紧差异，而且稍微用久一点就又松了。后来发现直接暴力涨紧能一劳永逸解决问题（使最松的时候也很紧）。

至于为什么使用 04c 链条，主要是因为不想在使用更大一号的交叉滚子，04c 刚好可以极限塞进现在的结构内，刚好能够快拆（需要转着拆）。强度方面笔者查到的链条载荷刚好能够承受 8016 电机的最大扭矩（在当前链轮大小下），不过没什么安全系数。两个月实测下来链条没断过。不过还是感谢南方科技大学同学对链条强度提出的担忧，让我每局比赛都带着一根链条以防意外。

本车 J0 所承载的惯量大，而且随着臂的姿态变化惯量也会有很大改变。不论软件怎样调都只能让一个范围内让 J0 稳定，如果臂伸出范围就有可能导致 J0 震。机械上来说这有可能是电机减速箱背隙、链条没完全涨紧、链条有松有紧、结构存在轻微形变等导致的。笔者已经尽量让链条涨到最紧，从理论上来说小链节的链条应该更接近皮带，传动更加平稳，但笔者不清楚如果换成自行车链条（链节大）会不会好一些，没有试过。最终软件调出一版只要臂不伸到最长就不震的效果（确实也不能伸直，超尺寸），因此结构上应该算是能用。

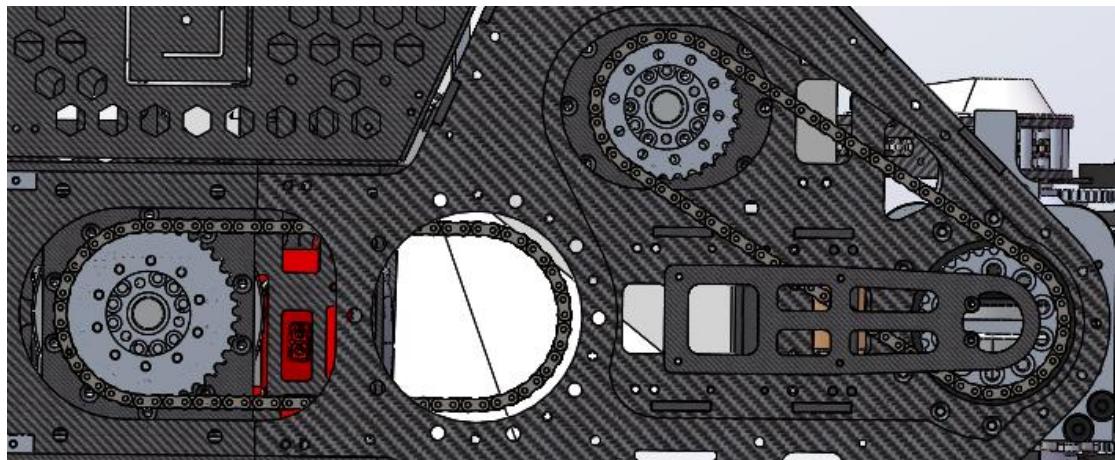


图 8 J0&J1 传动部分

### 2.2.2 J1

J1 同样采用 04c 链条传动，涨紧方式也类似，由于其负载相对 J0 更低，没有出现震动问题。将 J1 电机侧置是为了在有限的云台长度（现有设计已经贴着装甲板禁区边缘了）下尽量拉大电机和 J1 的距离，减少电机和机械臂活动范围的干涉。

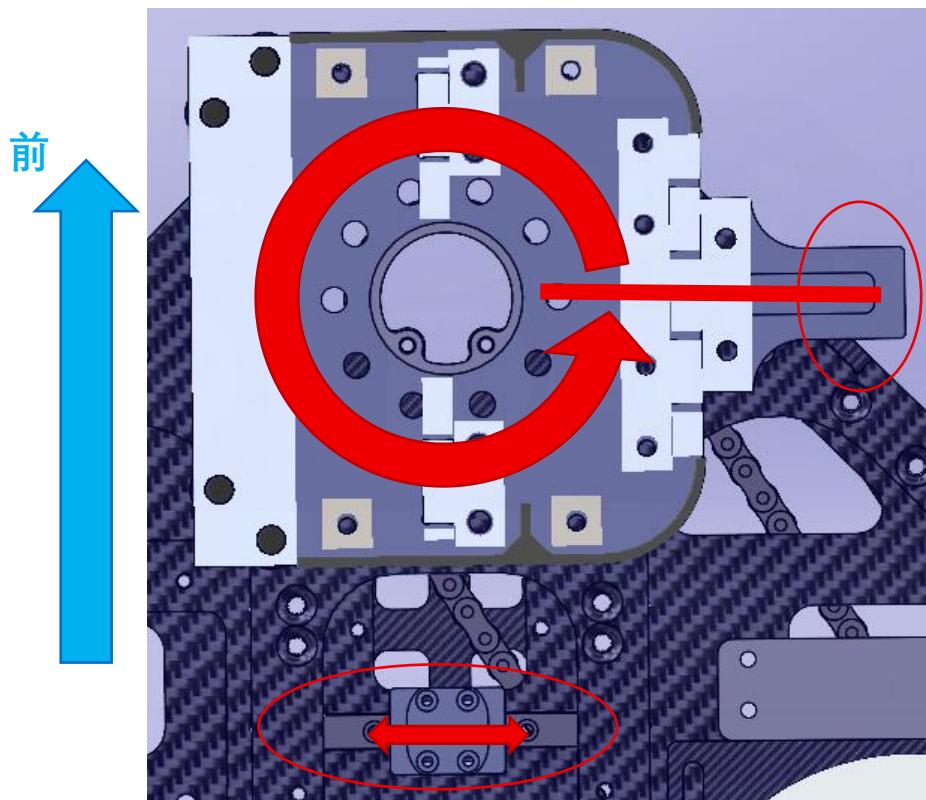


图 9 J1 360°限位

J1 通过一个滑动碰撞块设计了一个 360°限位，使得机械臂转动没有死角，避免“抓不到后背”，又不会发疯转动超过一圈把线干断。之所以将 360°限位的原点设计在右侧而非后侧，是因为上台阶时 J1 要进行 180°旋转，同时要保证左右一定的自由度用以调节整台车的平衡。这样的设计也保证了任何姿态翻倒机械臂都能把自己撑起来。

### 2.2.3 云台

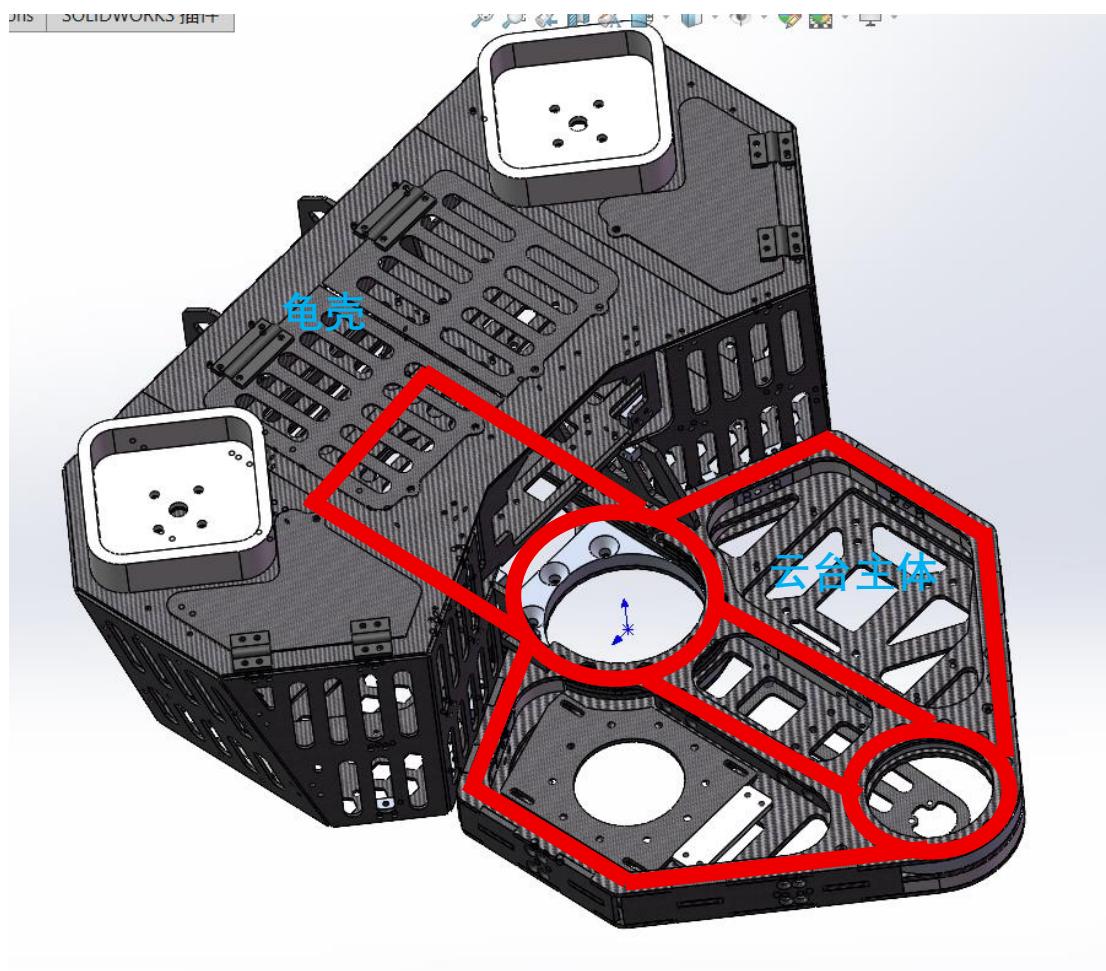


图 10 云台结构

由于没钱使用一体化机加工件，并且机械臂上的大负载会从 J1 传递到 J0，因此笔者着重加强了云台主体的结构刚度。通过三层碳板加铝排+3d 件+碳板复合梁实现 J1 与 J0 间的刚性连接。图中红线为主要复合梁。实际装出来 J1 只有微小的下坠形变，在机械臂把车撑起来时也没有发生明显形变。

电控仓笔者称之为“龟壳”，可快拆，内部空间很大，不多赘述。

## 2.3 J2&L2&J3

### 2.3.1 J2&J3

装配时注意铝件一定要压死轴承内外圈。笔者装配时会额外垫上一层 0.2mm 的打印垫片，非常好用。除此之外内圈两个 CNC 件之间有齿啮合在一起，以传递更大扭矩，防止螺丝断裂。至于铝件和电机之间的间隙纯粹是因为当时下载的领控电机模型和实际不一样。实际装配时没有间隙

J2 和 J3 都没有做独立的机械限位，图上可能有但后续拆除了。

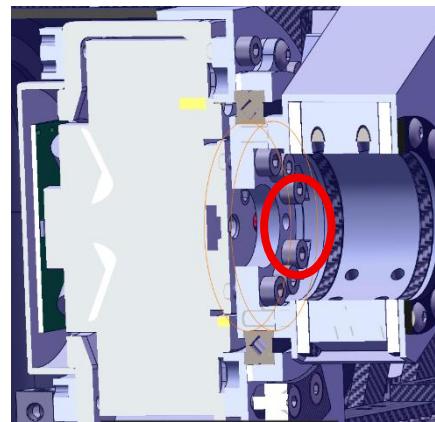


图 11 J2 截面

### 2.3.2 L2

主体是一根 30x60 的铝通，内部用碳板填充，提高抗弯抗扭抗冲击强度。

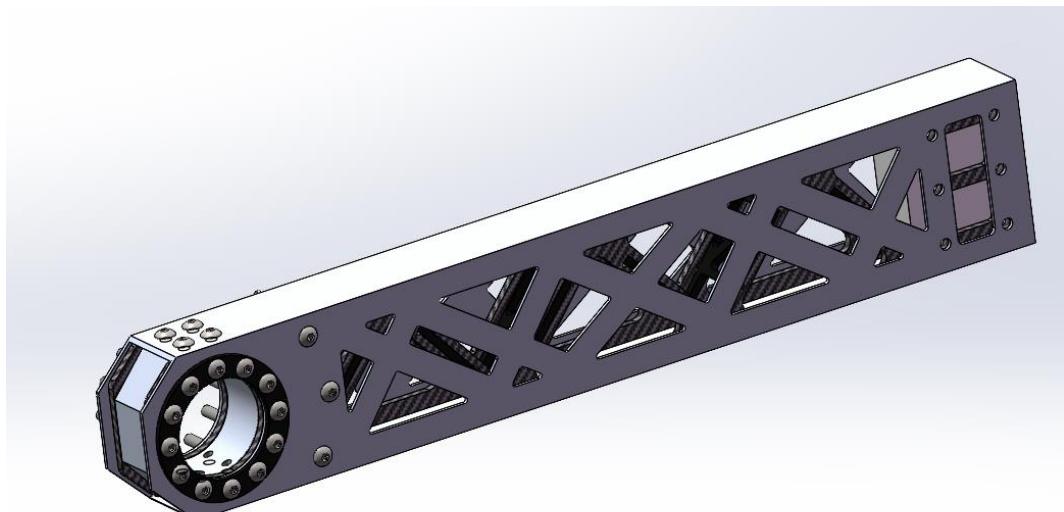


图 12 L2 铝通

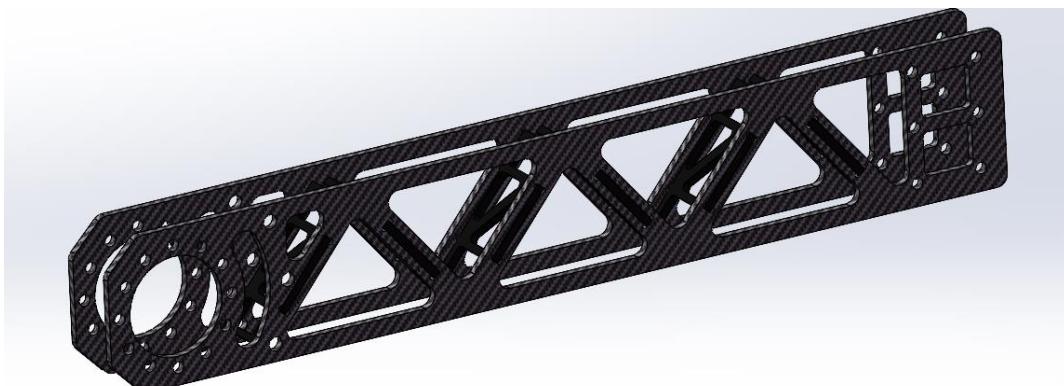


图 13 L2 内部填充

## 2.4 L3

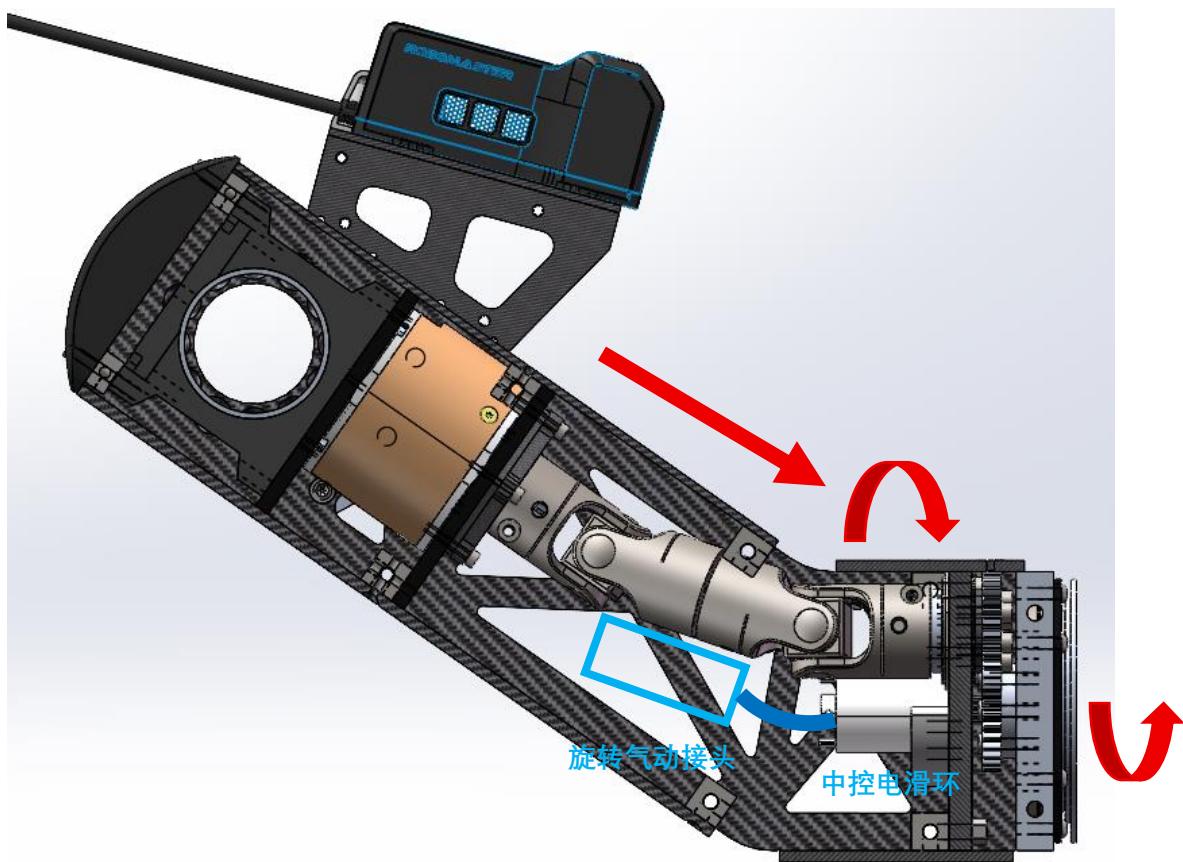


图 14 L3 截面

J4 最好能够无限旋转，又要过电过气。由于电气滑环过于昂贵且体积较大。因此笔者选择了分别使用电滑环和旋转气动接头。气路先过旋转接头，然后通过一根外径 5mm 的气管穿过中空电滑环。

传动部分不能直驱，用一组等速齿轮将转动传进去（笔者试出来铨洲最小能加工 1 模齿轮，精度不错，几乎没有背隙）。由于不想让电机突出来影响美观以及其他问题，所以使用了一套万向轴传动让电机刚好能够塞进 L4 结构内。

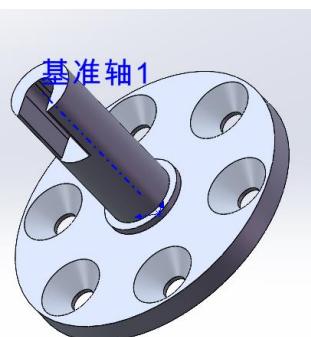


图 15 电机输出轴 CNC

电机输出轴上做了一个槽，用顶丝顶紧防止滑动。但实际上由于开槽直径必须大于顶丝直径，而且铝太软槽会被撑大，多级连接下来会允许 5-10°的滑动。最终版笔者直接用轴承胶将传动结构完全粘死，保证了可靠性。顶丝仅在极端情况轴承胶失效时防止 J4 完全松脱。

值得一提的是，由于这组万向节输入输出不平行，因此它不是一个等速传动，即电机角度与输出角度并不相等。根据万向节转速速比会在  $\cos\alpha$  与  $1/\cos\alpha$  之间波动，由于此处  $\alpha=19.3$  度和 21.7 度，因此最大最小速比大约为 1.1 与 0.9，并且这个速比可以通过调整万向轴相位进一步减小。在实际使用中，操作手并没感觉到转速或位置映射不对。

万向节需要使用带石墨轴承的（参考价 50 元/个），几乎没有背隙。普通万向节背隙很大完全无法使用。

## 2.5 Wrist

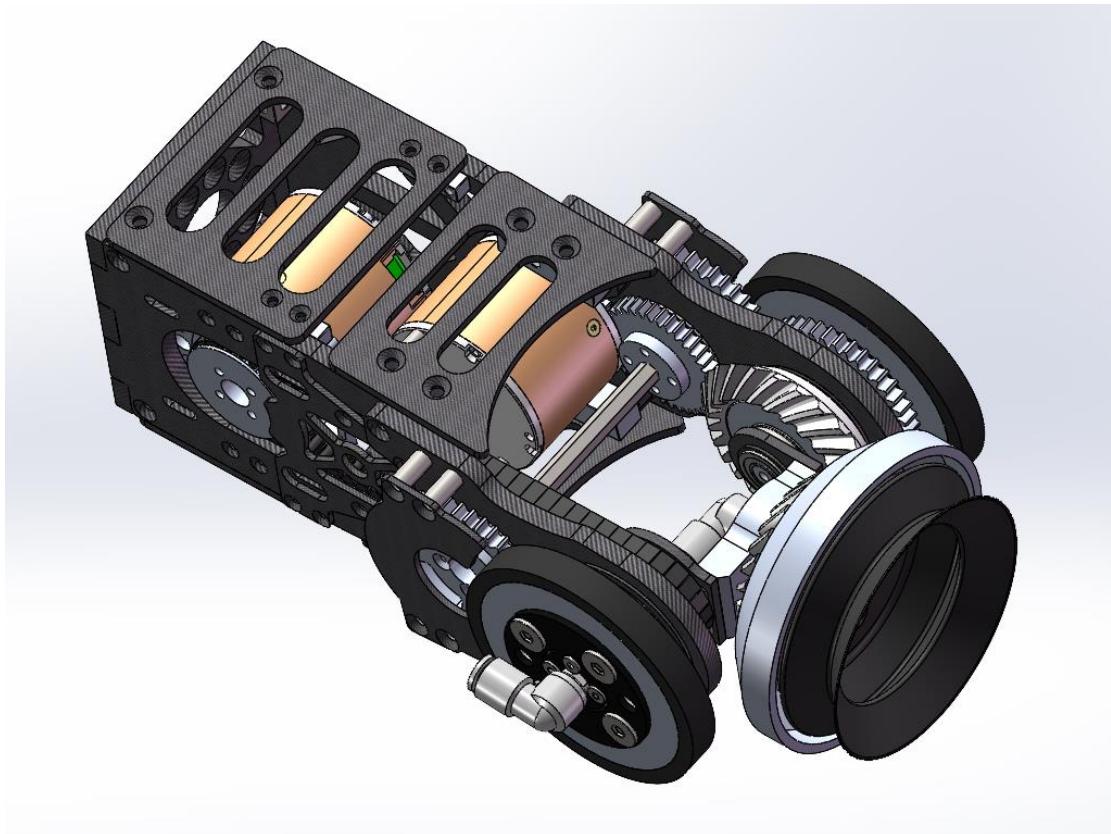


图 16 Wrist

设计目标是一个小巧紧凑，附带一组驱动轮的末端两轴。整体采用 rpr 结构。由于需要撑地时将吸盘收起来同时轮子转动，所以需要将驱动轮和 J5 pitch 解耦；考虑到轮子和 J6 roll 都是无限转动的，且不需要同时使用，因此笔者将轮子和 J6 串联驱动，共用同一电机。这样的设计还带来一个好处，J5 仅由单电机驱动，增加了精度，且上电无需校准。J6 的精度不太重要，而且零点位置不太重要。另外笔者希望气路尽量稳定，一方面不漏气，一方面气管不要随 J5J6 转动而动。

吸盘用了祖传的 HB80 风琴重载吸盘，配合改装的 3508 泵，吸力确实很强。笔者曾想测试用测力计正面拉掉矿石，测力计拉满了（250N）都没掉。吸盘的问题还是矿石容易被从侧面撞掉，通过一个铝件去稳定矿石的姿态能够很大程度上解决这个问题。

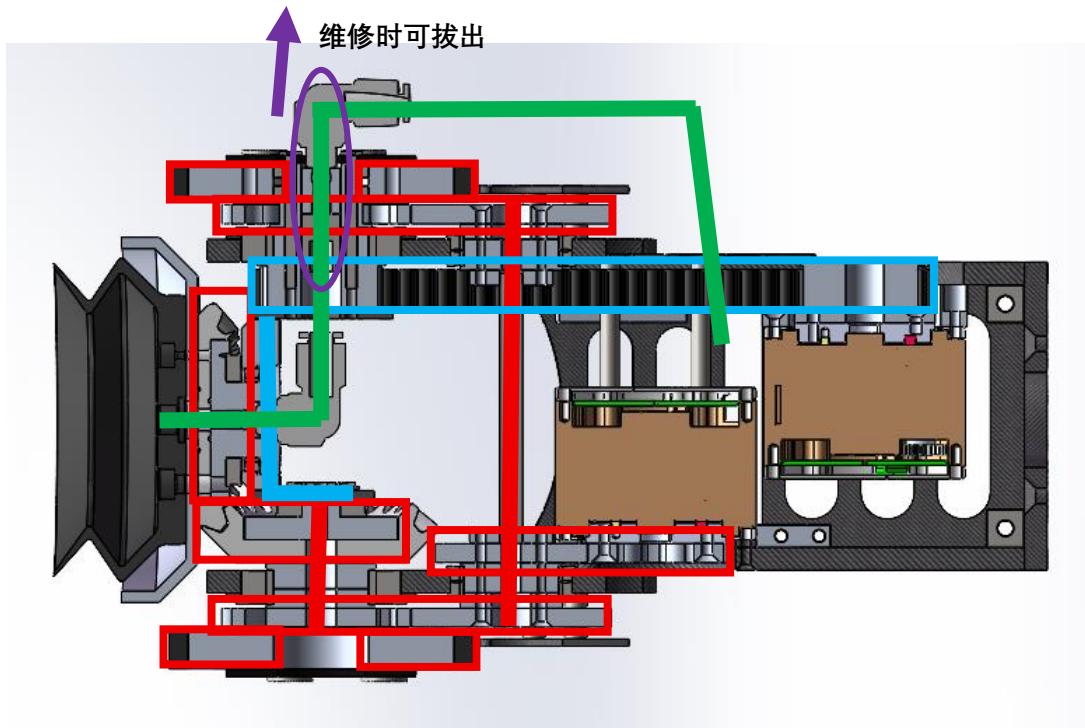


图 17 Wrist 轴系截面

J5 和 J6 用一套有点复杂的传动系统实现。图中蓝色是 J5 传动，用等速同步轮将电机位置传递到 J5 pitch，对轴增加强度。图中红色是 J6 传动，通过 3 组齿轮将动力传递到左右两包胶轮（淘宝成品件）上，最后从左轮通过一组锥齿轮传递到 J6 roll 上。上述所有传动结构都是等速传动。图中绿色是气路，通过两个旋转接头使无论 J5, J6 怎样转动，气路都不会漏气并且气管不动。气管通过侧面一个洞回到机械臂结构内，防止气管磨到同步带。

实际装出来 J5 无背隙、J6 的背系很小。气路几乎没有漏气风险，唯一可能会漏气的反而是吸盘连接处，可以用密封硅胶粘死。

这个结构最大的风险在于最右侧突出的旋转接头，在取金矿时操作手一旦没注意就可能会撞到矿槽直接断掉（适应性训练时出现过一次）。现在末端宽度 150，矿槽宽度大约 210mm。由于这个结构已经压缩到几乎无法优化，只能让操作手多加注意，以及上场时带好备件，万一断了场间换上。

## 2.6 限位、uwb 及走线方案

由于本赛季工程制作规则变更多次（笔者记得的改动有：最大尺寸从对角线变为边线、后面又加入跨越地形不限；uwb 从不可电动升降改为可以，从折叠≠拆卸变成可以拆卸），因此本车的限位方案也经过很多次调整。不过最后因为具备跨越地形能力，所以上场时是没有上任何联动限位的。这里大致分享一下限位方案和设计思路。

由于各个关节需要的活动范围很大，不能做死限位，所以需要一个联动限位保证合规。根据最开始的规则，本车机械臂只会在向上伸的时候超过 1100 的限制，因此最开始只考虑了高度上的限制。联动限位方式无外乎将 J2 信息投射到 J3 或者反之。

考虑一下 uwb 的放置，uwb 有三个方案，要么从云台后伸出一根长杆，要么从 J1 小云台伸出一根长杆，要么放在 J3 处随臂一起活动。由于 J1 特殊限位设计，方案一的长杆很容易被臂打到，也影响一个右侧存矿（存矿时 J1 只能从左侧转到后面），排除。方案 2 笔者认为过于不优雅，并且会影响到甩矿这一操作，因此也排除了。

方案 3 看似最优雅，但也是结构上最复杂最重的。不过方案 3 所需的结构刚好可以复用做联动限位，即将 J2 的水平面信息投射到 J3。因此最终选择方案 3。其实还有一个因素是笔者当时还想改底盘另做一版狗洞工程，在当时 uwb 不能单独电动升降的规则下，uwb 随臂一起升降几乎是大臂工程钻狗洞的唯一选择。



图 18 联动限位及 uwb 放置初版方案

由于 J3 需要反转，小臂需要从前面反射到后面（撑地和甩矿），因此 uwb 仍需要从 J3（其实不准确，是 J3 旁边单独的一个轴）伸出一个小臂的长度，以避免禁区问题。又因 uwb 的刚性连接要求，整个传动非常难设计。笔者最初认为连杆会比较好，刚性强。但 J2 的可活动范围超过 200°，常规平行四连杆方案会存在死点这一致命问题，因此笔者用了一组速比 2: 1 的 2 模齿轮将连杆活动范围减到 100° 左右，有了上图设计。但是装出来发现 uwb 力臂还是太长了，多级传动以及设计问题也导致背隙逐级递增，无法满足要求。

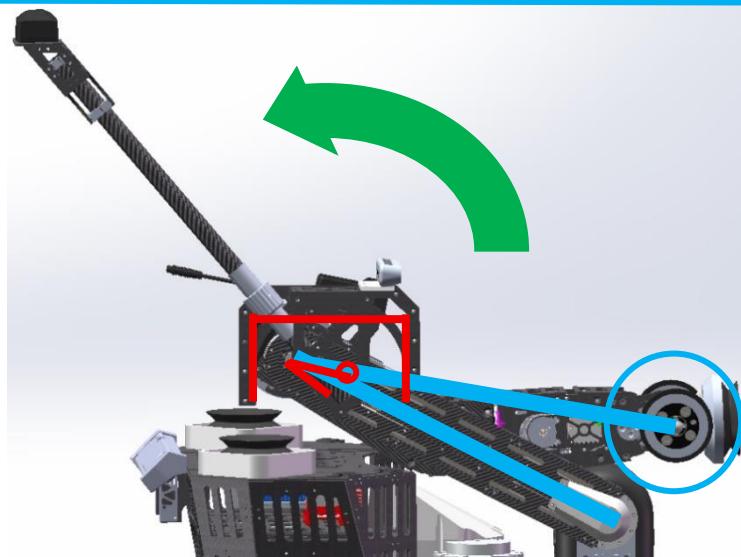


图 19 联动限位及 uwb 放置最终方案

最终版笔者使用 04c 链条传动，并且因为规则改动增加了前后方向的联动限位（上场时拆掉了），这样避免了死点问题，强度背隙使用下来也是可以的，适应性训练时曾两次从 200mm 台阶翻倒在地上，uwb 杆没有断。图中展示了大小连杆及活动范围限制的映射关系。

另外，限位在 J3 上的平台也可以作为图传或深度相机的位置，不过笔者尝试觉得效果不太好。这种方案可以把大臂往下伸，高度上是可以通过狗洞的(本车宽度不允许)，希望能给以后的狗洞工程提供一个思路。

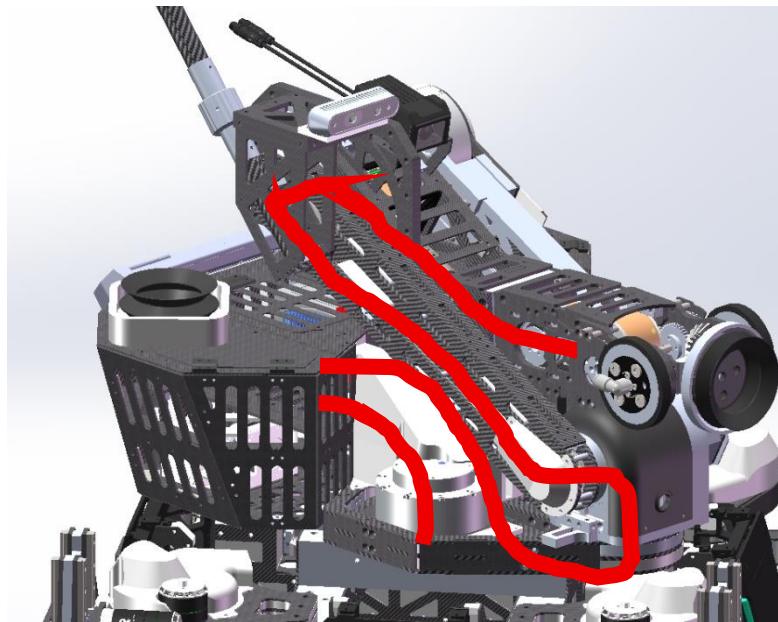


图 20 走线方案示意图

由于每个关节的活动角度都很大，因此本车不太能关节外走线，电线与气管都需要从特意设计的轴中孔穿过。如图所示，限位方案同时也方便了走线，具体走线孔可以在装配图里查看，这里不多赘述。

## 2.7 抬升结构

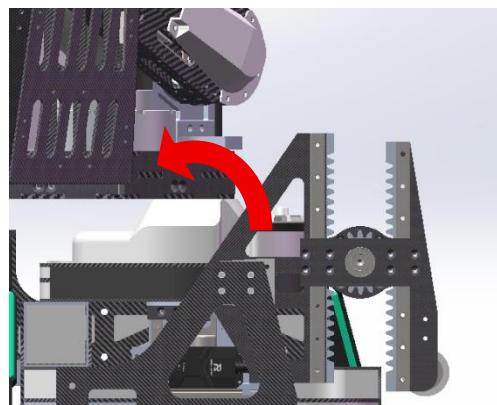


图 21 二级抬升

本车上台阶的思路为：用一对抬升装置扒住台阶，撑起前面，后面用臂撑起来，四轮悬空时依靠臂末端的一对轮短时间提供动力。复活赛道具训练时的测试视频：[复活赛寄了,可以发了](#) 过初始尺寸时需要将抬升结构折叠起来。

笔者认为上台阶对于工程只是一个附加功能，绝大部分时候用不上，起到一个威慑作用就非常不错了。因此不想牺牲底盘性能或机械臂性能为了上台阶而上台阶，而是将“上台阶”作为一个 DLC，需要就上，不需要上就拆换上其他功能结构，于是有了这样尝试。

从结果上来看，在仓促调试一晚上、操作手纯手动盲操（一手控抬升，一手拿自定义控制器控制臂，还看不见路）的情况下，用时最短用时 15s 登上台阶。笔者认为如果做到全程自动，这个方案是能够吃到 5s 跨越地形增益的。一方面抬升速度完全可以更快，上完第一级后的抬升复位也可以和向前移动同时进行；另一方面，RFID 放在车底前面，刚抬升的时候还能扫到下识别区，一旦登上二级马上就可以蹭到上识别区，5s 限制的不是上台阶

的全过程。笔者和队友今年实在没有时间将这个功能完善了，希望有人能够将笔者的梦想实现。

画完大饼（不是）后，写一下现阶段的问题：1、抬升结构太脆弱，小陀螺时非常容易被肘烂 2、上台阶时操作手完全没有有效视野，这个问题要么靠全自动解决，要么就需要另寻图传位置 3、稳定性堪忧，抬升机构能不能扒住台阶、机械臂会不会撑歪都是风险，可能需要反复调试打磨细节。

## 2.8 改装 3508 泵

由于购买到的直流有刷 C4 泵过重，而且打火花会让整个供电网崩掉，所以笔者无奈尝试（赛前不到一个月）将 C4 泵改装 3508 泵，未曾想效果不错，因此在这里简单分享一下。在这里感谢队内大哥蒋哥的思路启发。



简单来讲这个泵就是电机很垃圾，笔者将其改为 3508 驱动。可以将左侧这坨没用的东西去掉，只保留曲柄和单向阀，然后改装成 3508 驱动的。

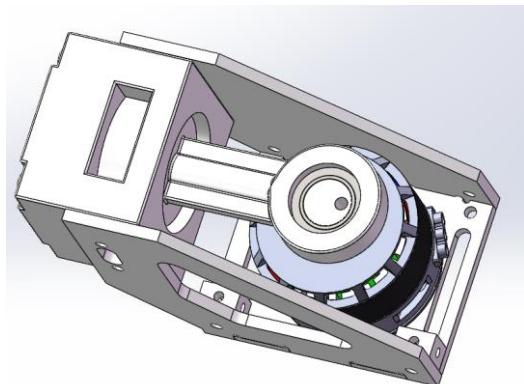


图 22 3508 改装泵

改装后泵真空度不变 -85kpa，流量明显变大且可通过 3508 转速调整（5000rpm 时就能明显感觉流量超过原版的 40L/min，最高能拉到 8000rpm），重量只有不到 300g。还可以通过读电机电流反馈得知吸盘有无吸上，起到一个类似气压计的作用。虽然没有其他队伍自研的泵那样融合了电磁阀，但胜在便宜（C4 泵 110 元/个）。

这版泵设计很粗糙，未来可以在曲柄上配重减少震动，可以优化一下结构使之优雅，甚至可以尝试找到更便宜真空度更高流量更大的泵来尝试改装。这里主要提供一个思路。

## 2.9 自定义控制器

自定义控制器其实就是同构构型，其实本身没有什么值得分享的。主要是要符合操作手的习惯，这里笔者工程的操作手即电控说他想要单手不换姿势的情况下可以操作机械臂向左或向右肘（即兑换四级矿时不需要换手换姿势），所以笔者按照他的手臂数据将自定义控制器 L2 右移，他尝试下来觉得很舒服。最终能够达到 5.8s 四级矿很大程度上得益于此。

简单来讲，自定义控制器需要符合人体工程学，需要让自家操作手觉得舒服，其实就够了。具体设计可能引人而异，因车体构型而异。

补充一点，笔者和操作手尝试过 delta 构型的自定义控制器，后来比赛时也和中国科学技术大学的同学交流过，我们认为 delta 构型确实没有什么优势，很多方面都不如同构来的简单直接好用，请谨慎尝试。

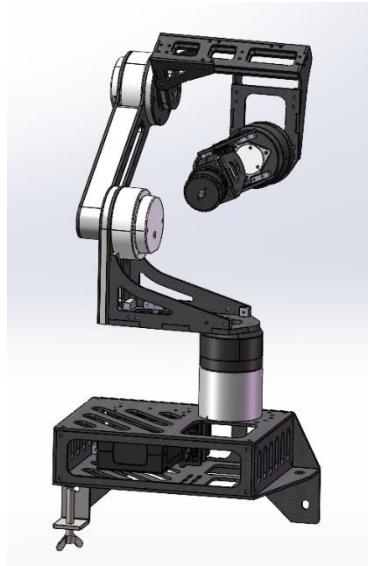


图 23 自定义控制器

## 第三章 反思与展望

事实上，这台工程从新建文件夹到上场只过了三个月，可以说从头到脚都是实验品。笔者搞了很多奇怪的小设计，小尝试，基本都写在这篇报告中了，这些奇怪的结构并不一定足够优秀（但确实省钱，至少笔者自认为这台工程算是便宜的），笔者希望能给未来的多功能工程研发提供一些思路。如果以笔者现在的视角看，这台工程设计理念上有些极端了：预想的额外功能太多，又要上台阶，又要甩矿，又要能掏对面的矿，还想追求兑矿速度、底盘性能。设计时又不肯妥协，只得越加越复杂。所幸从结果来看在核心功能上表现还算可以，额外功能上只能说有但称不上优秀。

笔者认为这版工程之后可以在做细致的轻量化设计，也可以删掉一些功能，强化重点功能。另外，这台工程笔者留给电控调试的时间太少了，很多功能机械上应该可行但没能稳定调出来。希望这台工程能作为一个测试平台为下一年的研发发挥余热。

遗憾吗？没有实现最初的幻想：开局上台阶，把对面的矿全甩回家，然后小陀螺扬长而去。遗憾固然是有一点的，但更多的是释然，仔细想来，我们做到的已经很多了。

本文写的有些抽象，花了很大笔墨写笔者的想法，很多细节没有提到。欢迎感兴趣的朋友来交流。