



RoboMaster 2023 工程机器人 结构部分技术说明文档

上海交通大学交龙战队

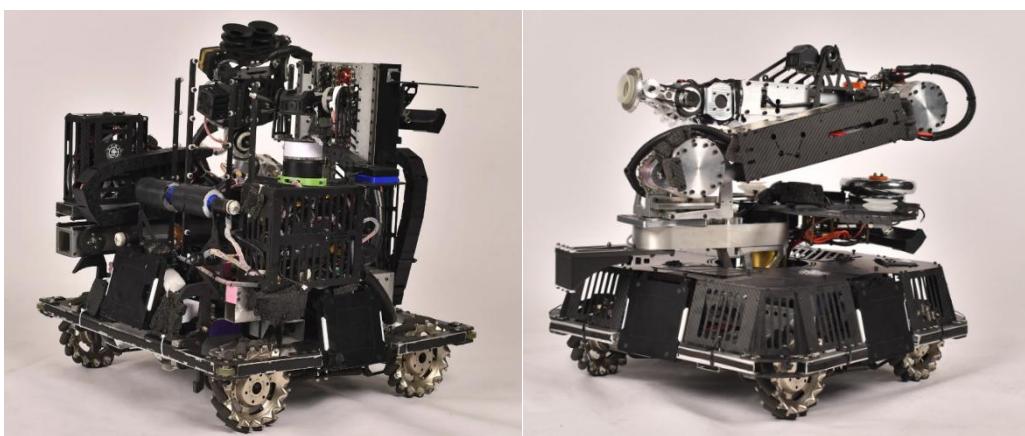
2023 年 9 月

RoboMaster 2023 工程机器人

结构部分技术说明文档

摘要

2023 赛季交龙战队工程组先在 22 赛季的技术基础上研发了 3P4R 构型的分区赛主力工程机器人，后在国赛备赛期研发了六轴机械臂工程机器人。本文将简要介绍分区赛主力工程（3P4R）与国赛主力工程（六轴机械臂）的机械结构和设计思路，一些比较具体的设计参数会酌情给出，希望给大家提供一些设计参考。



目录

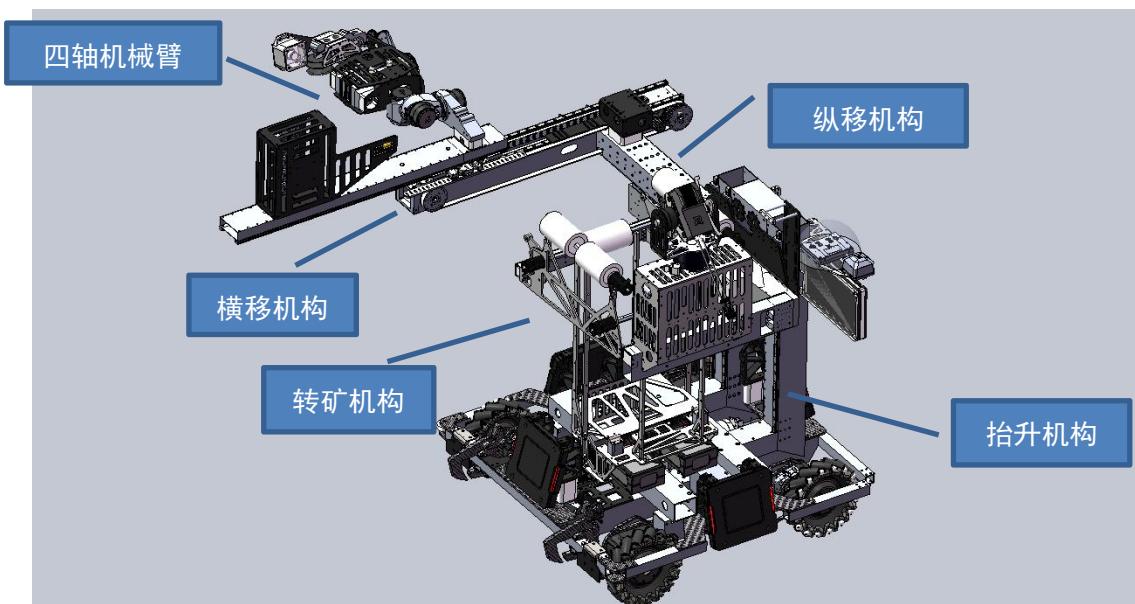
第一章 3P4R 工程结构设计简述	4
1.1 设计思路	4
1.2 结构简述	4
1.2.1 平移自由度结构简述	5
1.2.2 四轴机械臂	7
1.3 研发意义	9
第二章 六轴机械臂工程结构设计简述	9
2.1 设计思路	9
2.2 结构简述	10
2.2.1 底盘	10
2.2.2 Link0	11
2.2.3 Link2&Link3	11
2.2.4 WRIST	13
2.2.5 限位方案	14
第三章 后续研发期待	17

第一章 3P4R 工程结构设计简述

1.1 设计思路

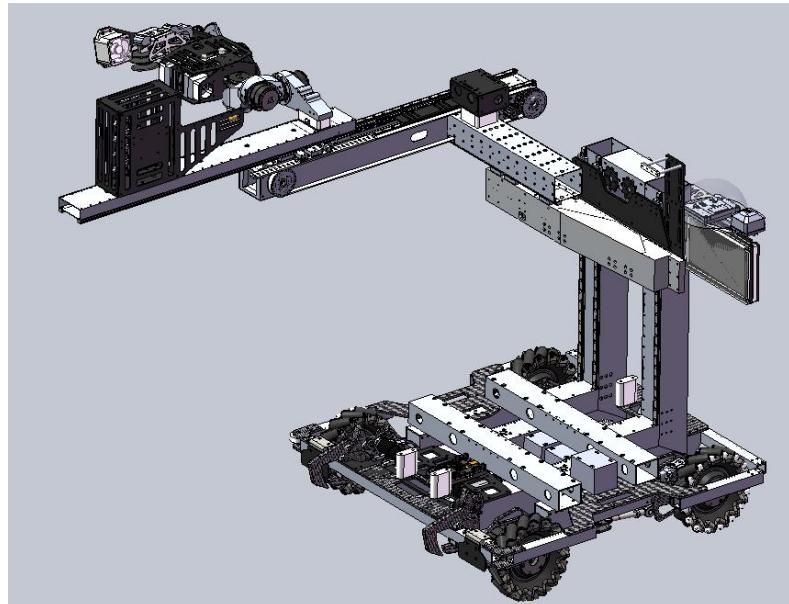
23 赛季工程机器人整体沿用过去麦轮底盘+抬升+纵移+横移机构的设计思路，同时为满足高等级兑换的需求，设计了一个体积较小的四轴机械臂。为精简结构、简化装配，以往的双边抬升机构被简化为了单边。

1.2 结构简述

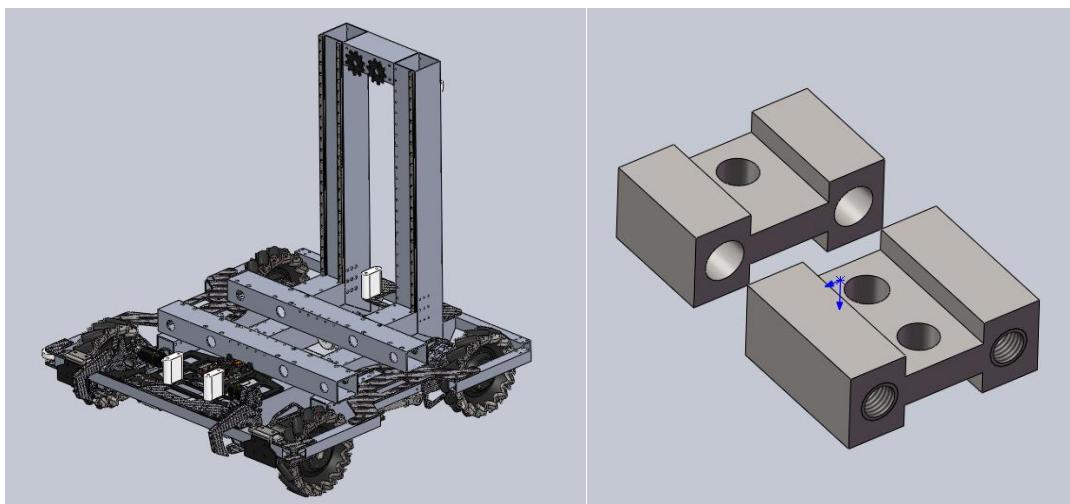


整体方案模型图及重要结构示意

1.2.1 平移自由度结构简述

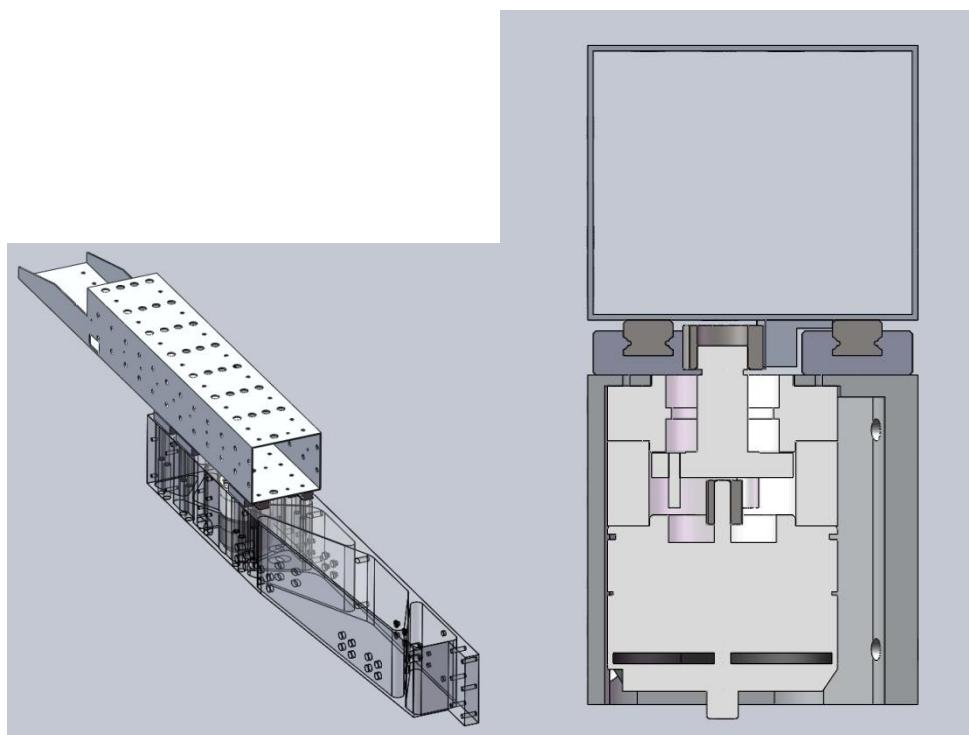


平移自由度整体展示模型图



(a) 底盘车架模型 (b) 链条调节器

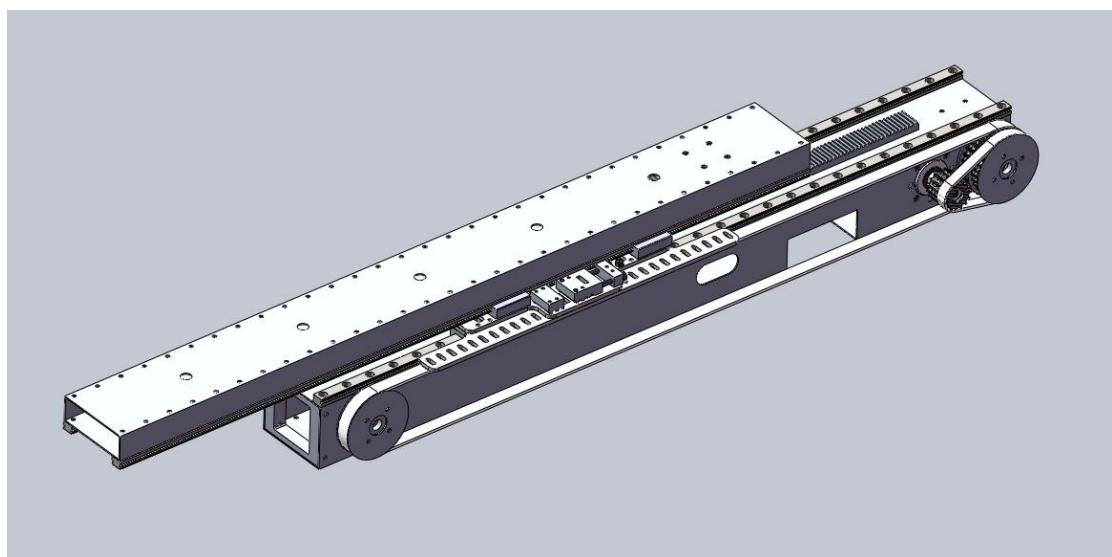
底盘铝方管基本通过焊接方式固定，抬升系统使用的平移结构为 MGN9 导轨与 MGN9H 滑块，驱动方式为双 3508+链传动，链条为开口的九速链条，开口处使用自主设计的链条调节器配合魔术扣，实现链条张紧并与连接纵移机构的碳板相连接。



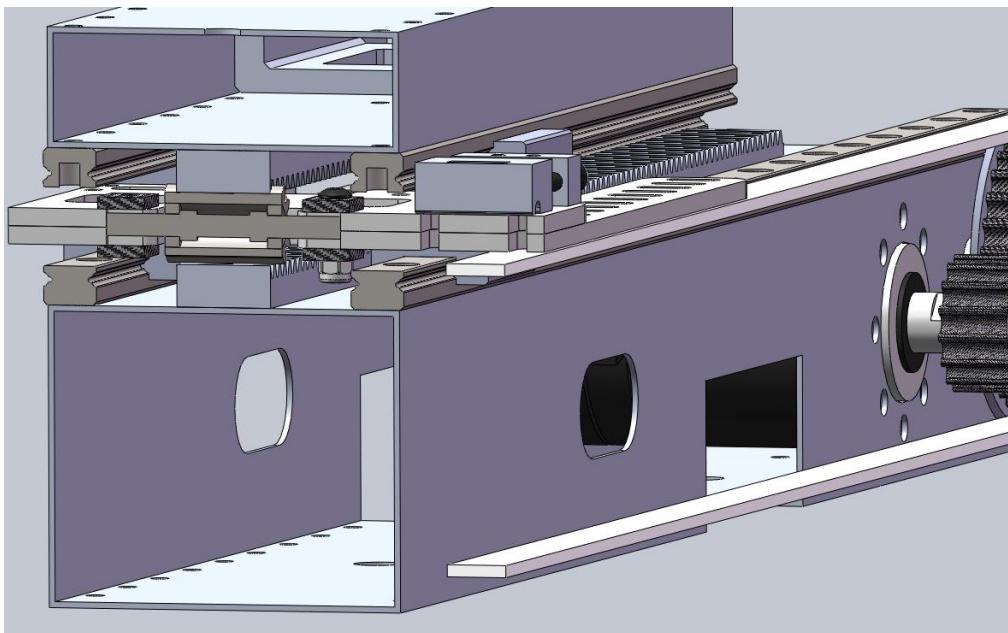
(a) 纵移机构模型图 (b) 纵移平移结构剖面模型图

纵移机构的固定级是 CNC 6061 铝件，移动级为 $50\text{mm} \times 60\text{mm}$ 壁厚 1.5mm 的铝方管。平移结构使用 MGN9 导轨和 MGN9C 滑块，驱动方式为改装 3508（ $1:5$ 减速比，单级行星减速，体积更小）+齿轮齿条。

在纵移机构的初版设计中，固定级和移动级都为铝方管，但固定级铝方管因承载较大，会渐渐发生塑性形变，而使用铝质内嵌件的补强效果并不好，且装配上比较繁琐。既然纵移固定级既在装配逻辑上有连接抬升机构、后部云台与纵移机构的作用，且有较大的承载，那不如直接设计一体机加工件，以尽可能降低装配、维护难度，同时保证结构刚度。



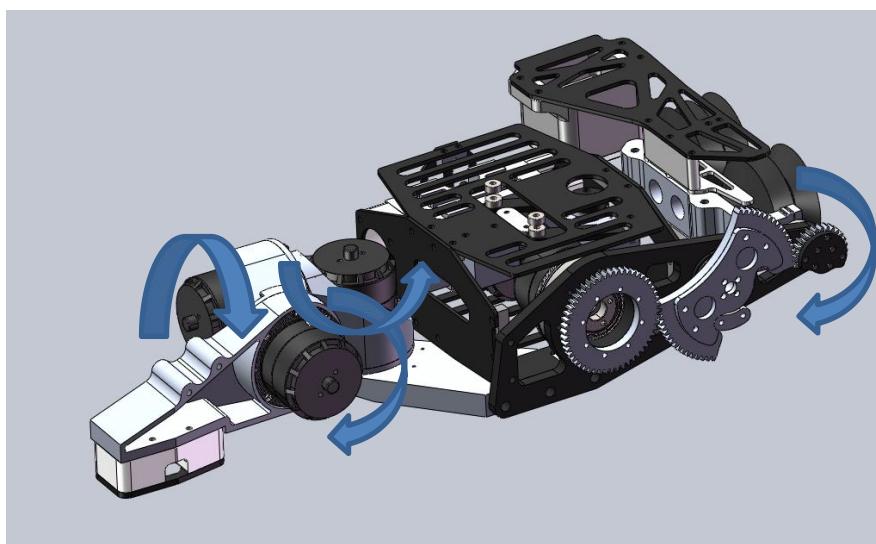
横移结构模型图



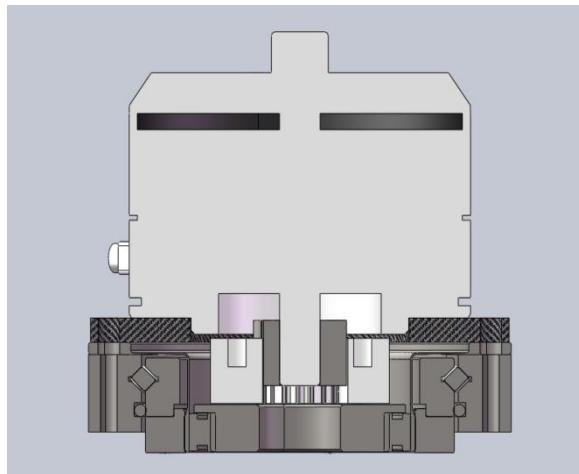
横移平移结构剖面模型图

横移机构与纵移机构类似，但采用 5M 同步带传动。需要注意是方管中央相对来说更容易下限，所以横移的齿轮齿条到后期会啮合不充分，产生较大的间隙，这一点可以再优化。

1.2.2 四轴机械臂



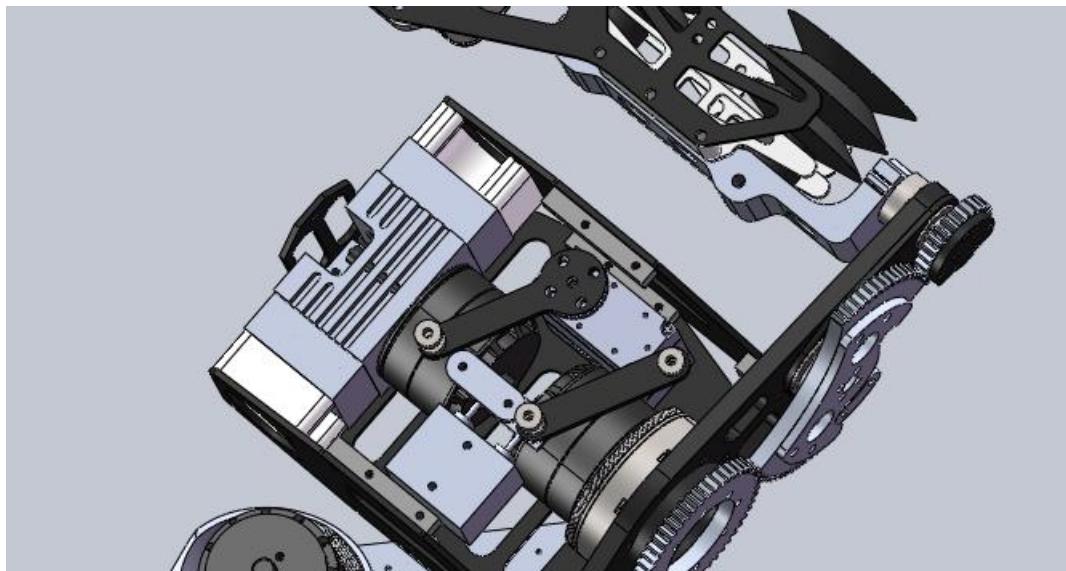
四轴机械臂自由度示意图



3508-谐波减速器关节剖面模型图

机械臂每个关节由一个 3508 电机驱动，通过 SHD-11-50 减速器进行减速。四轴的自由度关系如图所示。

四轴机械臂的总长大约 300mm，为了防止机械臂末端超出车体 500mm，因此 J4 轴线与吸盘的转动范围圆周基本是同心的。为了达成这个效果，从 J4 驱动电机到 J4 实际运动轴之间用齿轮做了传动。



气泵安装模型图

为了尽可能缩短气路长度，气泵结构被直接很紧凑地集成到了 J4 驱动电机附近。自研气泵的开源文档可查看 [RM2023-上海交通大学-云汉交龙战队-3508 气泵开源](#)。

1.3 研发意义

从技术角度来看，使用单边抬升的 3P4R 工程是从最常见的传统构型双边抬升工程优化改良而来，降低了装配与维护难度；从备赛角度来看，3P4R 工程是 22 赛季未能上场的国赛工程简化而来的，有较长的研发期，经过分区赛的实践检验后，我们基本相信这是一台结构稳定性较好的工程车，这使得我们后续有信心在六轴机械臂工程上比较集中地投入研发精力，只维持 3P4R 工程的正常操作手训练和正常维护工作。

第二章 六轴机械臂工程结构设计简述

2.1 设计思路

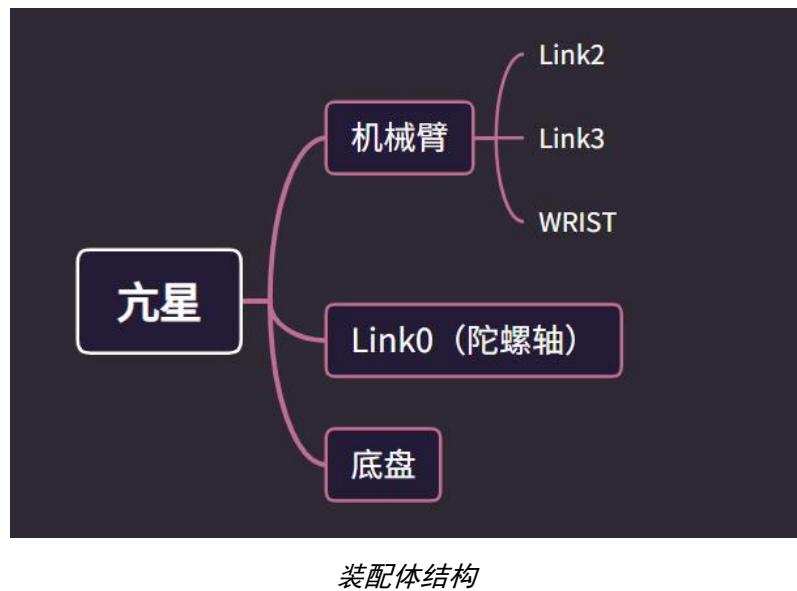
在设计六轴机械臂工程时，基本有这几条核心理念：

- (1) 模块化程度尽可能高。
- (2) 机械臂构型参数尽可能便于解算。
- (3) 尽可能利用到规则限制内的工作空间。

由于要在短时间内研发一台队史上没有技术积累的工程车，不得不做“每一个地方都有可能要被优化”的最坏打算，为了降低优化的成本（主要是时间成本），前期出主要的大架构时，基本可以做到每个大模块的耦合程度都极低（主要指装配逻辑上，有些一开始就不太确定的还会预先构思好可能的替换方案能不能很简单地换上去），但到后期进度越发吃紧，设计上就不怎么精心考虑理念（1）了，算是一件比较遗憾的事。

为了实现（2），设计上的主要难点在于如何设计 J4、J5、J6 三轴轴线交于一点的末端结构。同时，我们所采用的限位方案（也就是让我们最终实现理念（3）的结构）有一个很重要的内在逻辑是使末端执行器的体积尽可能小（限位方案在下文有相应介绍）。

就笔者个人的体验而言，六轴机械臂工程的装配难度远小于以前的传统构型工程，其主要工作量还是放在结构设计上。



2.2 结构简述

JOINT	驱动电机	减速器	传动方式
J0	达妙 8112 电机	电机内置 (1:6)	九速链条-链传动
J1-J3	达妙 8112 电机	自研 RV 减速器 (1:25)	直驱
J4	达妙 4310 电机	电机内置 (1:10)	直驱
J5-J6	达妙 4310 电机	电机内置 (1:10)	M3 同步带-带传动+直齿锥 齿轮传动、并联二自由度

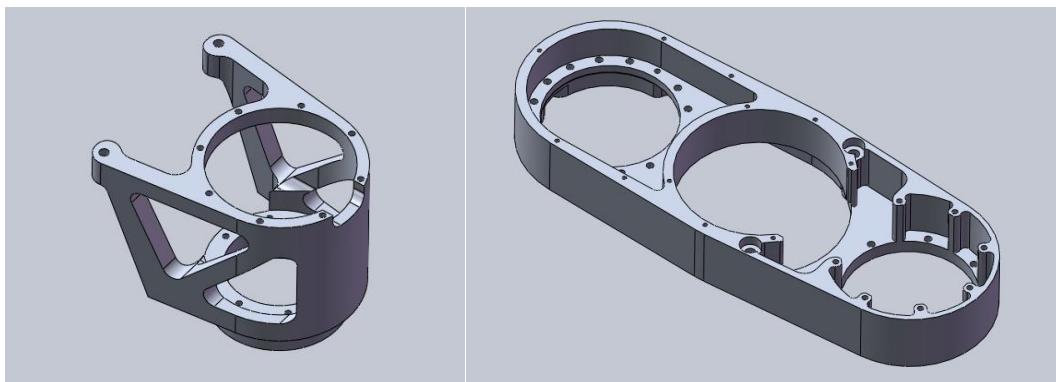
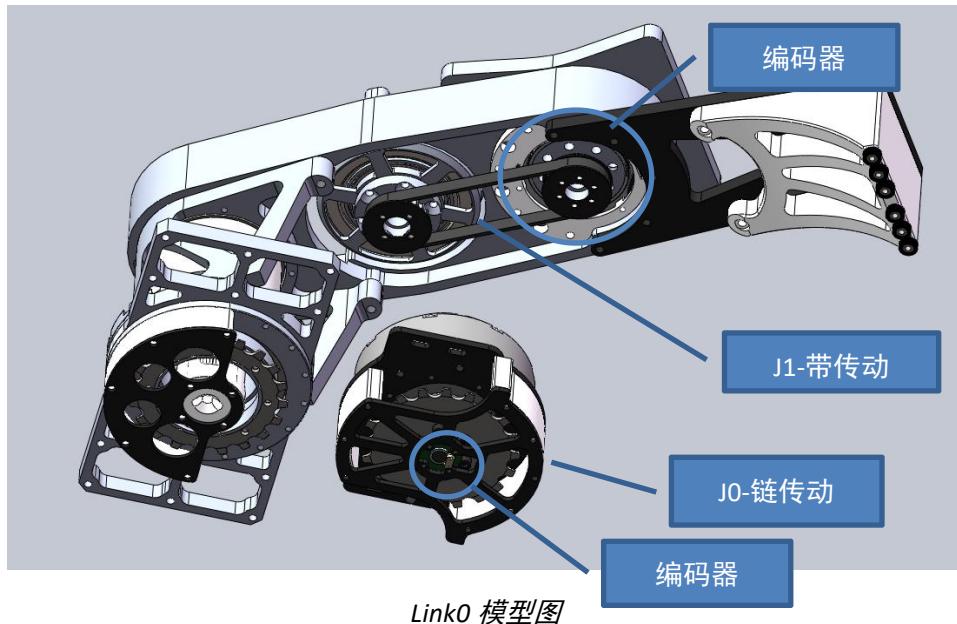
机械臂相关设计参数

2.2.1 底盘

为了尽可能降低系统复杂性，使用的是传统的麦轮底盘。与 3P4R 工程相比，没有焊接过程，并字形的车架主体通过铝方管内嵌件上的螺纹孔用螺栓连接，没有太多特别的地方，对这种车架结构不了解的还可以参考交龙战队过去的开源 [RM2020-上海交通大学-交龙战队-步兵机器人机械技术开源](#)。

2.2.2 Link0

在装配结构上，Link0 是底盘与机械臂主体之间的过渡；在功能上，Link0 向上安装着 J1 的驱动结构、向下连接一对滑环与 J0 的驱动结构，使得工程机器人也能实现真正意义上的小陀螺。



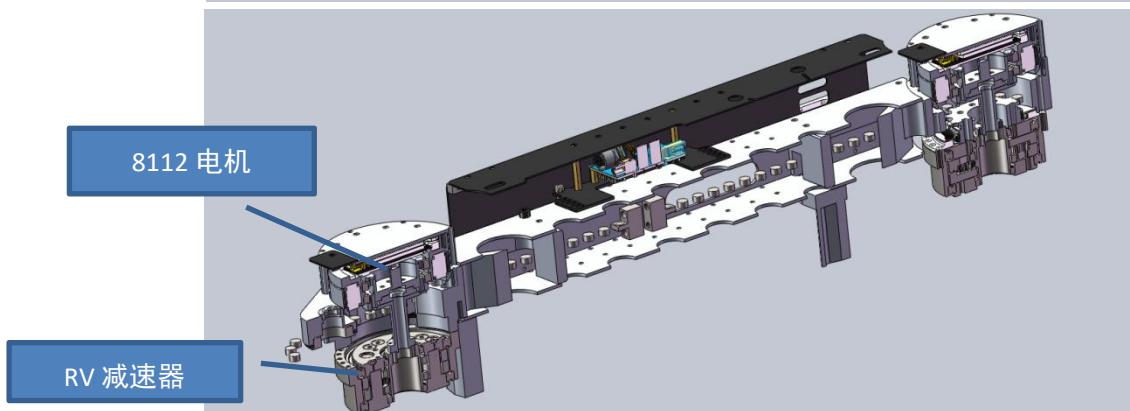
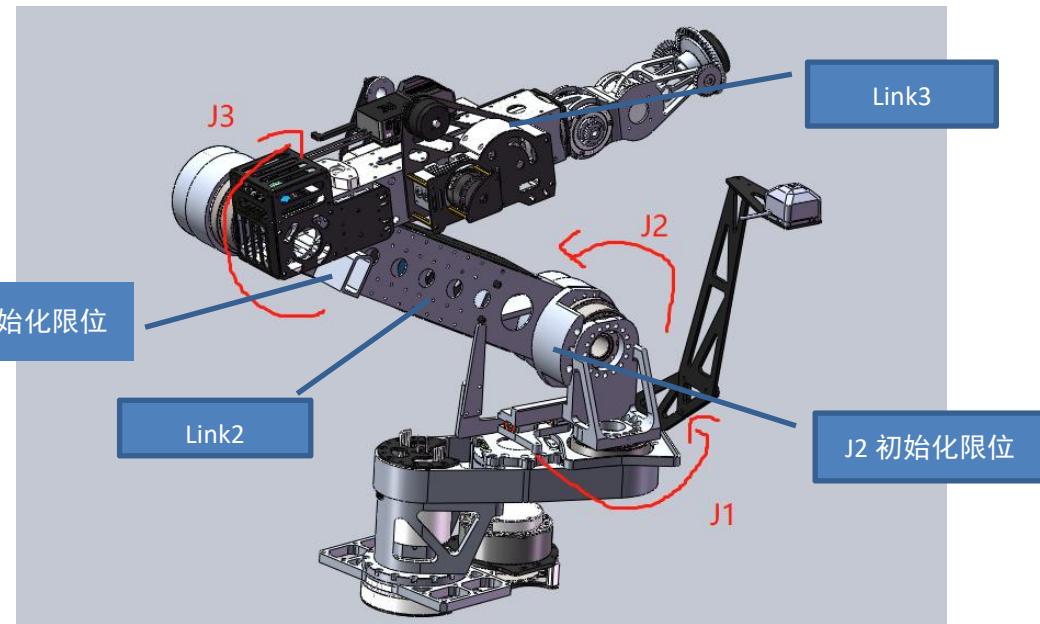
J0→J1 机加工件

滑环采用内外嵌套的形式，外为 MT2069（12 路，每路 10A）的空心滑环用于供电，其 $\phi 20\text{mm}$ 的空心圆柱空间内放置了一个外径 $\phi 12.5\text{mm}$ 的信号滑环（12 路，每路 2A）。

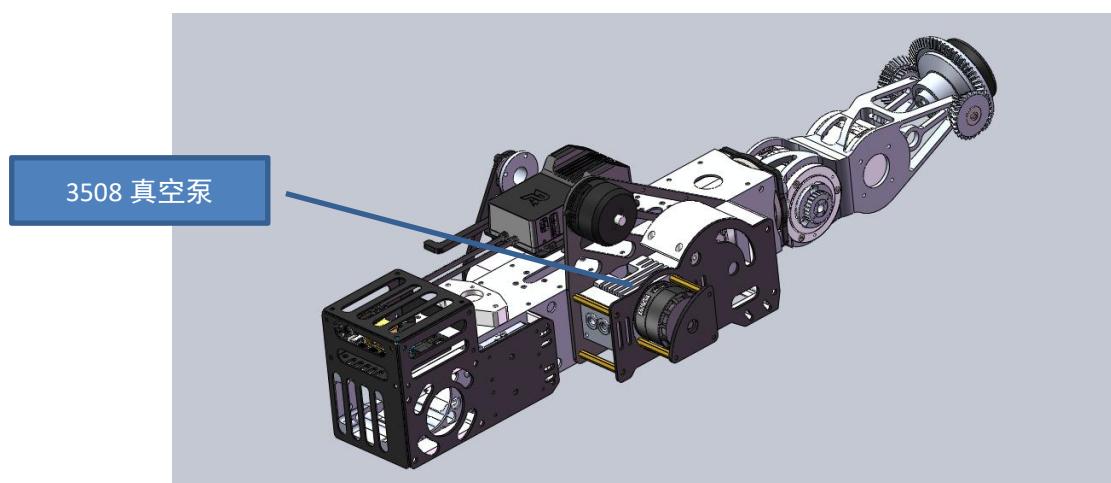
2.2.3 Link2&Link3

Link2 和 Link3 的设计没有什么很特别的地方，就是关节处机加工件+铝方管的组合，中间还有一些电控元件的体积整合问题。Link3 上安装了一个 3508 真空泵，3508 真空泵的开

源可见 [RM2023-上海交通大学-云汉交龙战队-3508 气泵开源。](#)

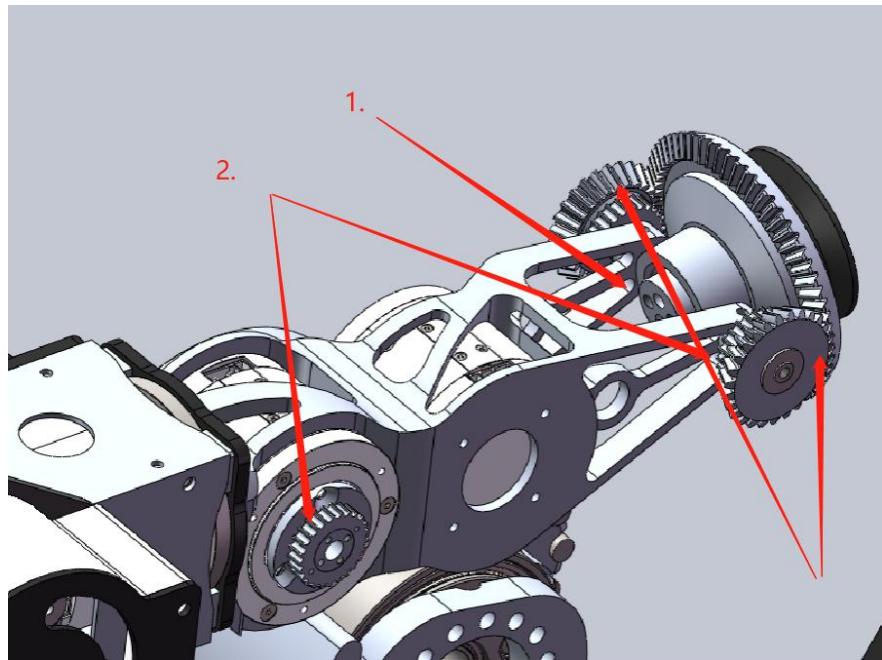


Link2 剖面模型图



Link3 模型图

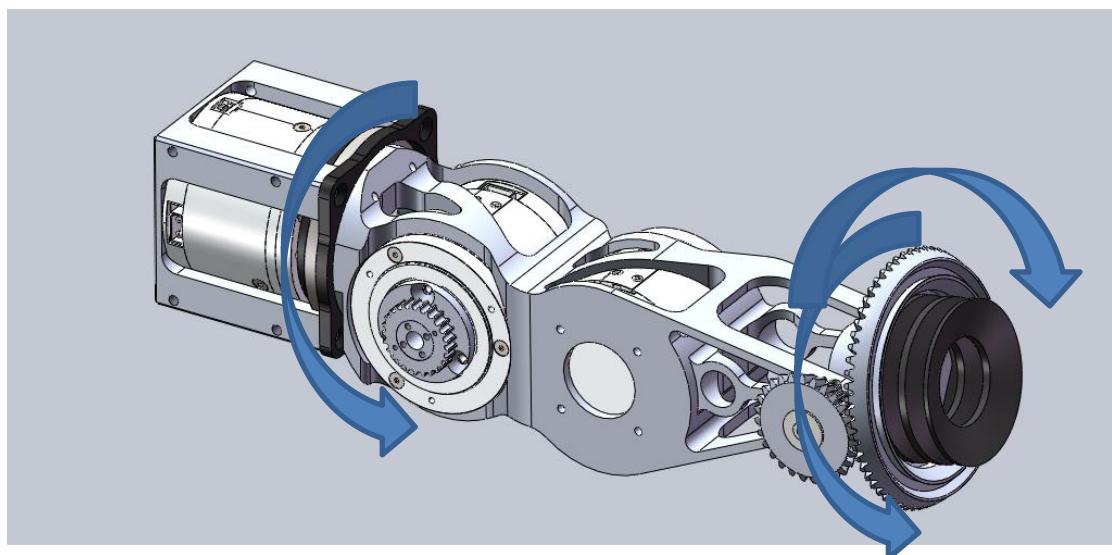
2.2.4 WRIST



WRIST 模型图

WRIST 的主要结构可以这样分解：

- (1) 气路-J6 轴系集成件，集成了 J6 轴系的轴承端盖和末端吸盘气路的螺纹接口。
- (2) 带传动，两个电机对置，通过两组带传动传递运动信息，两电机不同的运动模式耦合对应着 J5-J6 自由度的运动。
- (3) 直齿锥齿轮传动，主要起集成体积的作用。



WRIST 自由度分布

在末端执行器的选择上，实际比赛中为了适应矿石表面的粗糙印花，使用了 MP-50 海绵吸盘。海绵吸盘的一个问题是海绵层很容易脱落，可以用胶水二次固定一下，基本就不会

发生脱落。此外还需要时常检查海绵层有没有破损。

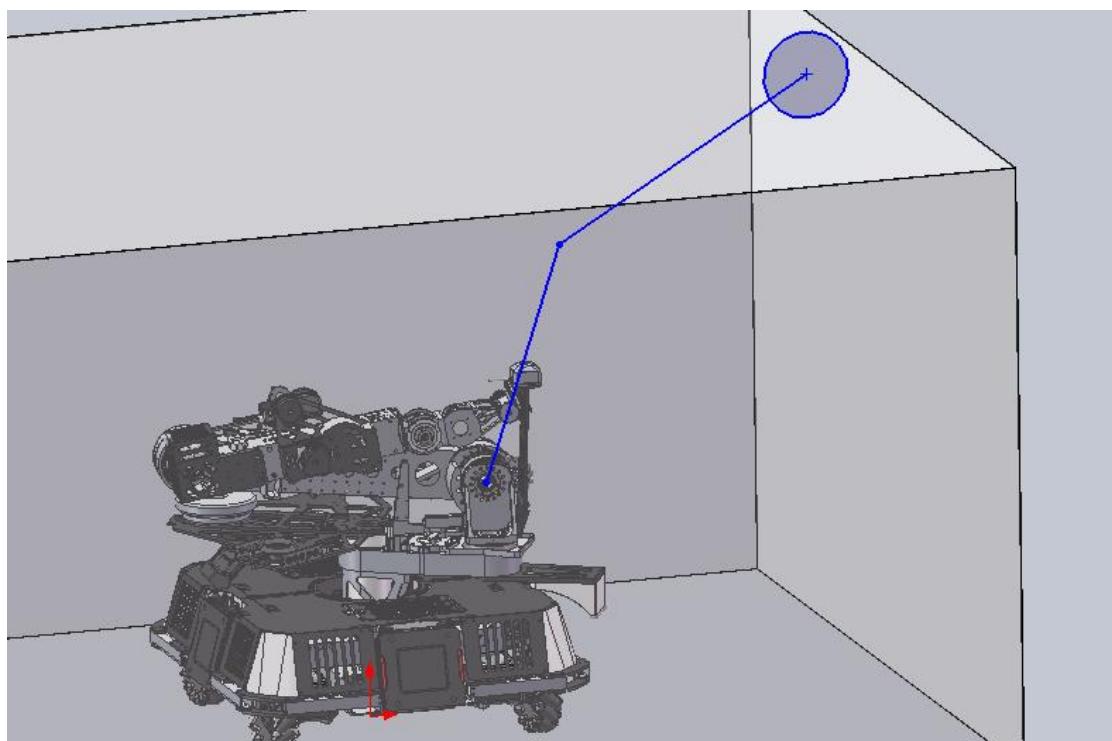
2.2.5 限位方案

限位方案对机械臂本体的结构要求主要有两点：

- (1) J1-J3 主要贡献空间坐标。
- (2) J4-J6 主要贡献姿态，三轴轴线相交于一点，且末端体积尽可能小。

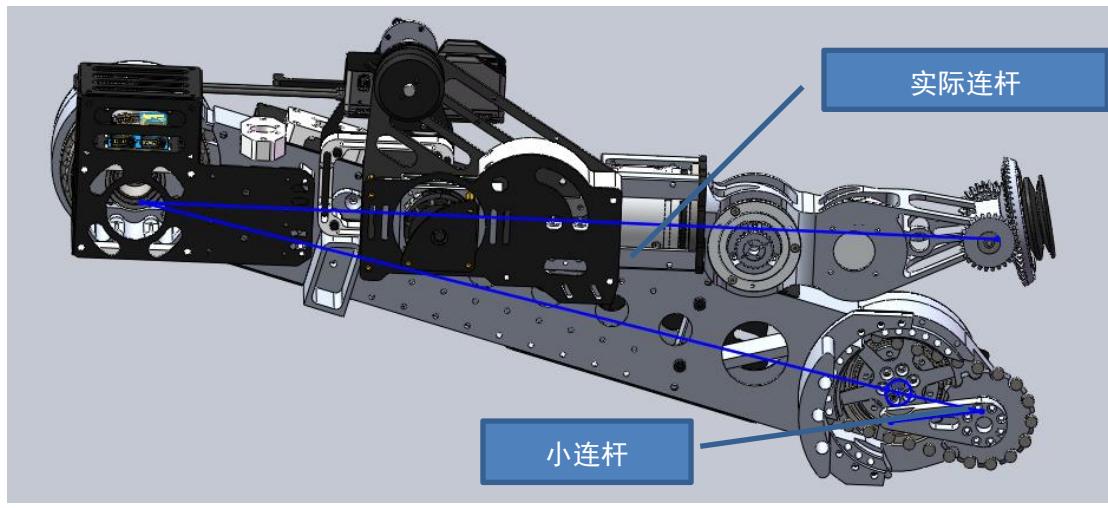
2.2.5.1 机械臂本体的简化

在前文对 WRIST 结构的描述中可以看出，末端的吸盘与下方的锥齿轮结构在转动时扫过的空间可以近似于一个球体，也就是说对于规则中的尺寸限制，实际上跟尺寸限制空间“交互”的机械臂可以被简化为两根连杆和末端的一只 $\phi 90\text{mm}$ 的球体。由于球体半径是一个常数，实际上我们只需要考虑两根连杆在地面上的投影长度。



与实际限位空间“交互”的简化机械臂

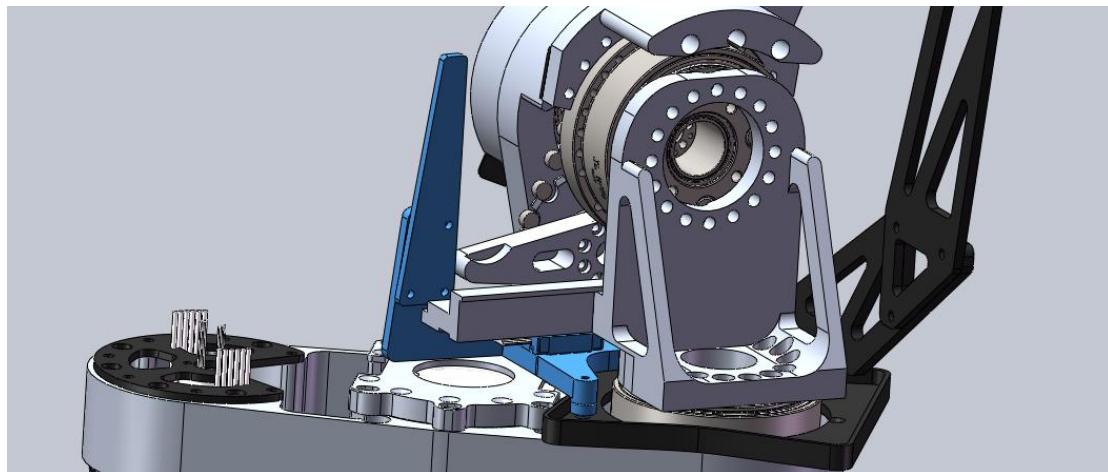
本方案的做法是：使用链传动，将 J3 的运动信息传回到 J2 处，这样就形成了一组等比缩小的小连杆。



连杆缩放示意

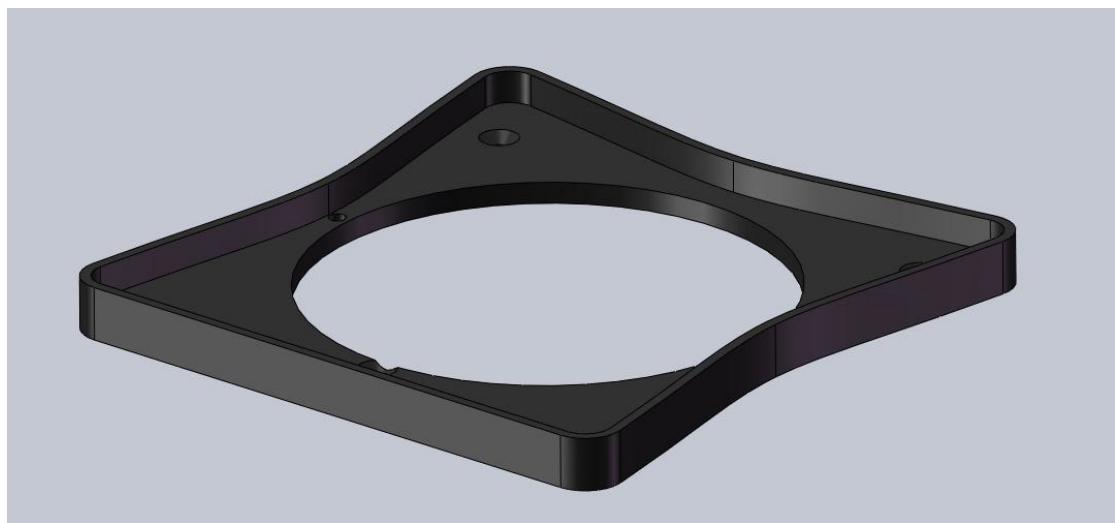
2.2.5.2 建立 J1 角度与前伸量限制的映射

如 2.2.5.1 所述，假设我们只限制小连杆的前伸量为定值，那么我们可以得到一个工作空间为圆柱体的机械臂。但我们实际上想要的是一个工作空间为立方体的机械臂，因此就必须建立 J1 角度与前伸量限制的映射。



限位机构模型图

上图中的蓝色零件组合即为限制前伸量的边界，中间用滑块滑轨与 J1 机加工件相连，蓝色零件组合下端装有一个 $\phi 10$ 的深沟球轴承，深沟球轴承与黑色的限位盘零件直接接触。当 J1 转动时，蓝色零件组合能运动到的最远点随之变化，这样就建立了 J1 角度与前伸量限制的映射。限位盘零件与深沟球轴承的接触曲线可以自行计算得来。



限位盘零件

第三章 后续研发期待

笔者认为这个赛季研发的六轴机械臂工程还有很多不足，但大体上能起到“验证”和“探路”的作用。有了这样一台比较完整的机械臂工程以后，队里下一步的优化和研发也就有依托了。结构上，这台工程车还可以做比较精细的轻量化和模块化设计。先阶段工程机器人模型的选择总是受限于尺寸限制，末端执行机构也有比较严重的同质化现象，如果后续规则做出了更有利于机械臂发挥作用的改动、吸引更多队伍来做机械臂工程，本文或许可以提供一些初步的设计参考。

本开源文档写得比较简略，只讲了大体的设计思路并介绍了部分重要结构，欢迎感兴趣的朋友来交流。