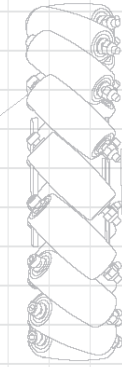




Using a BL-66 motor driver module and Field-Oriented Control (FOC), the RoboMaster G300 Brushless DC Motor Speed Controller enables precise control over motor speed.



Exclusively designed for the RoboMaster G300 BL-66 Brushless DC Motor, the M3000 Assembly Kit includes a motor, cables and a terminal board.

RoboMaster Reference System Specification Manual, RoboMaster Reference System User Manual, Introduction of RoboMaster Reference System Module

The M3000 Assembly Kit includes several cables and a terminal board, ensuring a complete and reliable system for your RoboMaster G300.

# ROBOMASTER 机甲大师超级对抗赛 技术方案

哈尔滨工业大学（深圳）南工骁鹰 编制

2023年9月 发布

# 前言

本文档由哈尔滨工业大学（深圳）南工骁鹰编制，适用于 RoboMaster 2023 机甲大师超级对抗赛。主要撰写人员包括：

| 模块 | 撰写人员 1 | 撰写人员 2 |
|----|--------|--------|
| 机械 | 曾泽康    | 李垚     |
| 硬件 | 王宏杰    | 吕家昊    |
| 软件 | 吕家昊    | 王宏杰    |
| 算法 | 钟万淇    | 杨晟琪    |
| 其他 | 欧阳时进   |        |

# 目录

|                          |          |
|--------------------------|----------|
| 前言.....                  | 2        |
| <b>1. 概述.....</b>        | <b>4</b> |
| 1.1 工程机器人战术定位与设计目标.....  | 4        |
| 1.2 其它学校工程机器人分析综述.....   | 4        |
| 1.3 工程机器人功能定义.....       | 7        |
| 1.3.1 底盘.....            | 7        |
| 1.3.2 执行机构.....          | 7        |
| 1.4 机器人核心参数.....         | 8        |
| 1.5 设计方案.....            | 9        |
| 1.5.1 机械结构设计.....        | 9        |
| 1.5.2 硬件设计.....          | 16       |
| 1.5.3 软件设计.....          | 16       |
| 1.5.4 算法设计.....          | 20       |
| 1.5.5 机器人操控说明.....       | 26       |
| 1.6 研发迭代过程.....          | 30       |
| 1.6.1 前代工程记录.....        | 30       |
| 1.6.2 测试记录.....          | 38       |
| 1.6.3 版本迭代过程记录.....      | 41       |
| 1.6.4 重点问题解决记录.....      | 41       |
| 1.7 技术方案复盘.....          | 43       |
| 1.7.1 赛场性能表现情况分析.....    | 43       |
| 1.7.2 赛场性能表现与规划对比分析..... | 44       |
| 1.7.3 经验总结.....          | 45       |

# 1. 概述

## 1.1 工程机器人战术定位与设计目标

从 2022 赛季开始，超级对抗赛引入机械臂兑矿站且可选择兑换等级，单一矿石在不同等级的兑换模式下获取的经济有很大的差异；在 2023 赛季全国赛中引入一系列机制包括削减工程机器人基础血量、减少小资源岛银矿数量、更改金矿石掉落机制、增加兑换经济累计奖励、增强金币兑换复活机制等，可见一方面经济获取对局势的影响大大增加且获取经济的难度有所提升，对工程机器人取矿与兑矿的能力提出更高要求，另一方面削弱了工程机器人拖车救援与战术卡位的作用。

在 2023 全国赛规则下，由于己方小资源岛只有三个银矿石，为创造稳定的经济优势，工程机器人必须具备很强的金矿获取能力。金矿获取途径包括空接掉落矿石、拾取大资源岛 2、4 号位平稳矿石、拾取大资源岛 1、3、5 号位随机矿石、拾取地面矿石等，工程机器人应具备上述所有情况的应对能力；由于加入了经济累计奖励机制，兑换四级矿石与五级矿石所获得的累计经济差距被再次拉大，且在机构设计上获取大资源岛 1、3、5 号位矿石与兑换五级矿石有相似之处，故该工程机器人应有稳定兑换五级矿石的能力。由于对抗赛局势节奏快，工程机器人对于复杂姿态取矿与兑换需要准确且快速，参考 2023 赛季分区赛中深圳大学与南京航空航天大学的工程机器人表现，决定采取视觉辅助兑换（取矿）与自定义控制器体感操作结合的控制形式。

## 1.2 其它学校工程机器人分析综述

此处主要分析 2023 赛季分区赛各学校工程机器人。从机械结构，战术安排，人机交互来分析。

|             | 兑换级别      | 平均兑换时间   | 空接 | 兑换数目 | 视觉 | 自定义 |
|-------------|-----------|----------|----|------|----|-----|
| 深圳大学        | 五级        | 28.83333 | √  | 13   |    |     |
| 哈尔滨工业大学（深圳） | 四级        | 22.67742 | √  | 31   |    |     |
| 东北大学        | （一金三银）四级  | 19.46512 | √  | 33   | √  |     |
| 南昌大学        | 四级银（可以五级） | 18       | √  |      |    |     |
| 南京航空航天大学    | 五级银       | 21       |    |      |    | √   |
| 桂林电子科技大学    | 四级银       | 15.8     | √  |      |    |     |

### 东北大学

底盘上搭载短距离横移机构，带动上层二级升降、二级推出机构，通过各升降、推出的差动以及末端 pitch 运动实现对矿石的位置以及姿态控制。优势在于保持了一贯的最大空接高度，差动机构通过遥控器易于操控，简单的结构也有利于维护以及赛场上的稳定性。

几乎每一场都可以空接到第一个矿石以保证经济优势，舍弃了五级矿石的兑换，但更高效率的四级兑换（每个矿石从自身矿仓取出到兑换成功平均仅用 20 秒）保证了团队的经济，同时让工程有更多时间去做战术动作。

从人机交互角度看，一方面为图传单独设立升降，为操作手提供了更好的视野，另一方面在兑换时视

觉 UI 通过屏幕上闪烁的四个角点提示是否识别到兑换框，提高了兑换的效率。

整车完成度高，目标清晰，舍弃最大经济总量，选择最高经济效率，注重稳定性与操作体验。但是对于国赛规则兑换越多经济倍率越高的改动有不适应之处。

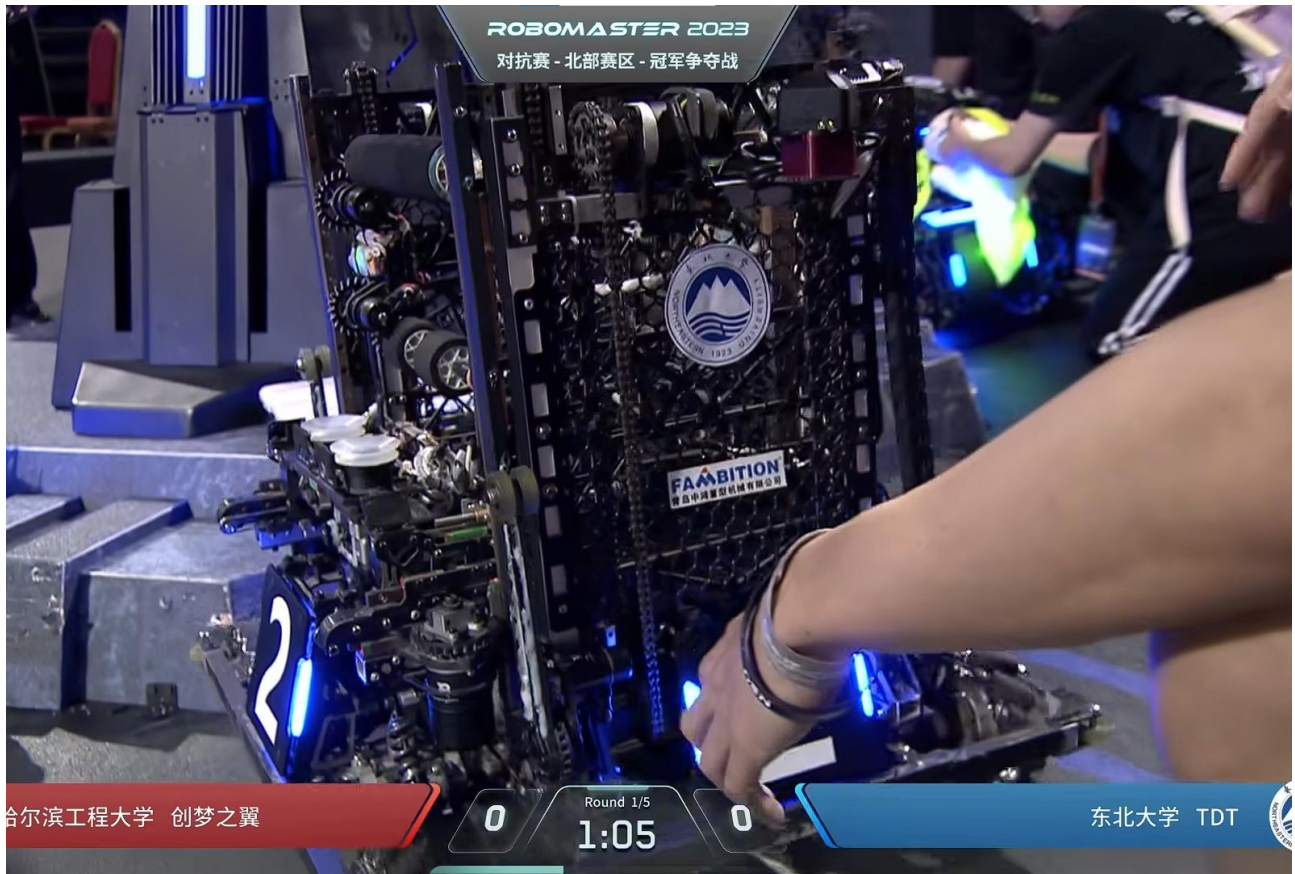


图 1.2-1 东北大学分区赛工程机器人

## 深圳大学

使用 3p3r 的结构，其中机械臂第一个关节为 yaw 转动轴，末端执行机构使用差速器原理，使用锥齿轮实现了 pitch 和 roll 的运动，很好解决了最大空接高度与机械臂超尺寸的问题。能够空接、地矿、五级兑换以及不规则槽矿获取。

在比赛中优先空接金矿，另外兑换 1~2 个五级银矿即可保证分区赛中的经济足够。能够下 200mm 台阶并且稳定通过飞坡禁区前陡坡让它能很好地对对方吊射英雄进行卡位。

从人机交互角度看，兑换时先让车体抵住兑换站，根据兑换矿朝向调整左右位置，距离地面 400mm 左右的高度以及左右距离较宽的升降机构让视野很清晰，末端短距离的横移能够很好的帮助兑换的调整。但是末端两自由度的耦合可能会较难适应自定义控制器。

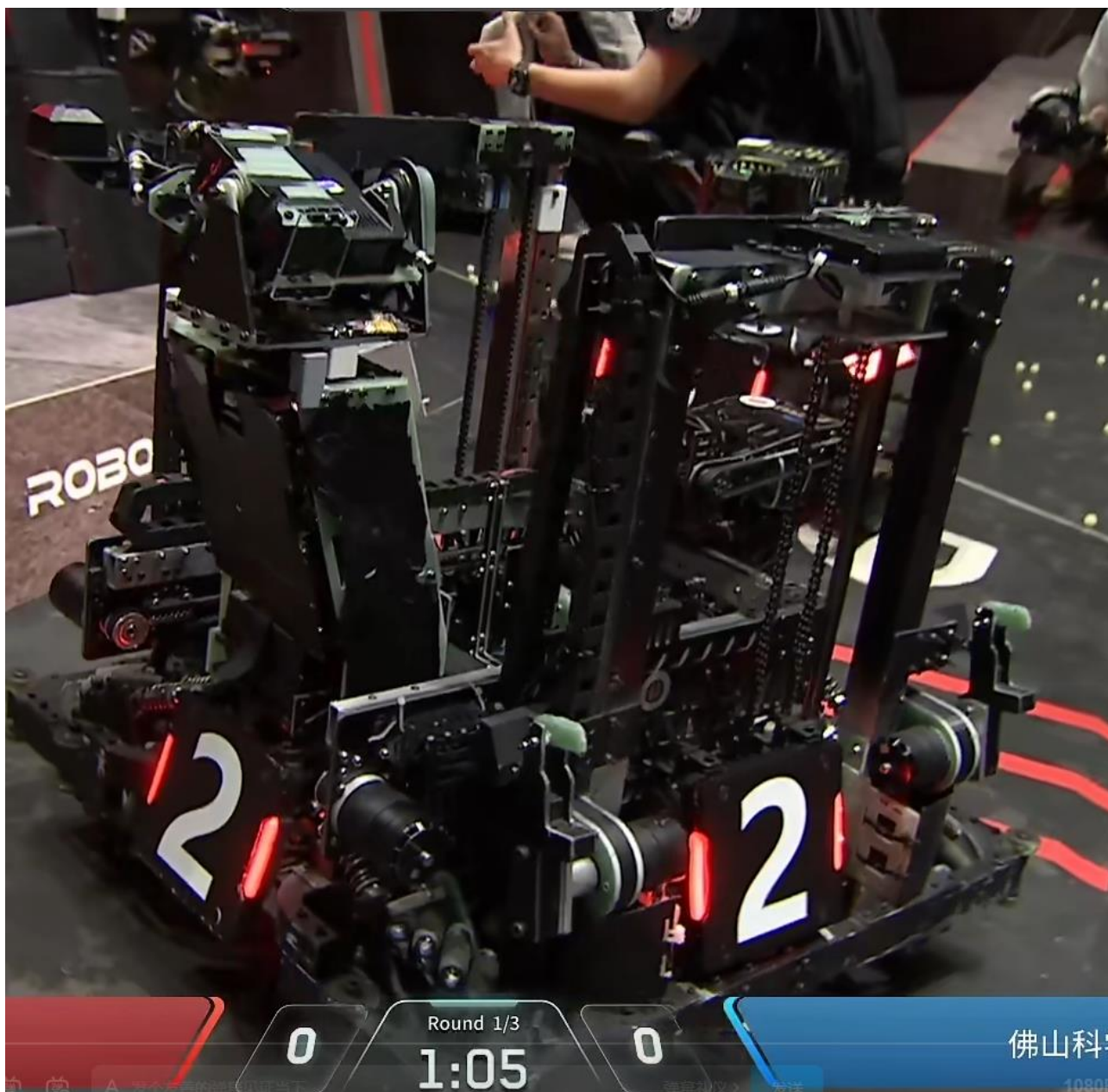


图 1.2-2 深圳大学分区赛工程机器人

### 南京航空航天大学

采用 3p3r 结构，舍弃空接，末端机械臂结构紧凑，长条型吸盘托乘矿石底部送进交换框。这一兑换动作使得视野更加开阔，可观测到绝大部分的矿石与交换框，与自定义控制器的控制模式相适应。

### 桂林电子科技大学

采用 3p2r 结构，涵道吸盘正常为吸盘，反过来可以将矿石吹飞到自己一侧，加上单独的地矿机构，保证了稳定获取第一个金矿石 250 的额外经济。图传摆放位置和大多数工程机器人不同，在车体靠前（兑换时）的位置，在兑换时有很清晰的视野。

## 哈尔滨工业大学

使用内外层两套升降，外升降只空接，车体内二级升降搭载三轴机械臂执行其他任务，不设置矿仓。机构之间的矿石交接通过丢在地上捡拾完成。整体运行依赖一键的自动化流程。



图 1.2-3 哈尔滨工业大学分区赛工程机器人取矿

## 1.3 工程机器人功能定义

### 1.3.1 底盘

**通过性：**工程机器人底盘各向接近角、通过角均不小于  $25^\circ$ ，主行进方向接近角、通过角不小于  $35^\circ$ ，以保证其能通过场地中的大部分坡道；悬挂结构能使其在起伏路段正常行驶，保持可操控性。

**平稳性：**在满足通过性的前提下，尽量增大轮距，以避免通过坡道或上层执行机构工作位置较高时车身倾倒。

**可靠性：**避震器与电子元器件等脆弱结构受保险杠与保护壳的保护，必要元件作减震处理，以增长其在比赛激烈对抗情况下的可靠性。简化底盘结构，轮组等重要结构模块化，便于维护。

### 1.3.2 执行机构

**取矿机构：**采用吸盘+无刷活塞泵作为取矿机构，吸取矿石完成各种动作或通过起伏路段时不使矿石松脱。

**兑换姿态：**使用吸盘为抓取机构时，对于五级难度的任意兑矿站位姿，都有至少三种兑换姿态。该工程机器人对于五级难度一般兑矿站位姿，其兑换姿态为：吸盘轴线与兑矿站入口面法线 $\vec{e}$ 平行，在兑矿站位置较高时兑换姿态为：吸盘轴线与兑矿站入口面法线 $\vec{e}$ 垂直。且要求在机器人底盘与兑矿站不发生相对移动时，其执行机构仍能达到五级难度所有兑换位姿。

**取矿功能：**快速、稳定吸取银矿石，能够在最大高度、最大伸出尺寸限制的姿态稳定空接金矿石，能够拾取落在大资源岛框内所有姿态的金矿石，能够快速、稳定拾取地面矿石。

**储矿结构：**储矿结构能够储存至少 2 个矿石，并能一定程度上调整矿石在其中的位置与姿态。

**简单可靠：**仅使用一个主执行机构，以尽量少的自由度实现上述所有功能。减轻上层结构重量，降低重心；

减小控制难度；便于检修维护；增加可靠性。

## 1.4 机器人核心参数

| 名称                   | 参数  |
|----------------------|---|
| 重量（含裁判系统）            | 31kg  |
| 基本尺寸（长*宽*高）          | 595*590*595   |
| 最大伸展尺寸范围（长*宽*高）      | 1085*740*996  |
| 执行器件（电机、气缸等）用途与数量说明等 | 底盘轮组：3508 套装带减速箱*4<br>升降电机：3508 套装带减速箱*2<br>推出电机：3508 套装带减速箱*2<br>横移电机：2006 套装*1<br>转矿机构：2006 套装*2<br>机械臂电机：DM-4310*2、2006 套装*1<br>视觉识别：广角无畸变工业相机*1<br>图传云台：升降 2006 套装*1、Yaw 轴 3508 套装*1、Pitch 轴 SPT17HV6kg 舵机<br>气源：真空泵 H20-85<br>吸盘：ZP63HBS |
| 接近角                  | 主方向：40°<br>侧向：50°   |
| 通过角                  | 主方向：40°<br>侧向：27°   |
| 主执行机构自由度             | 6   |
| 最高兑换等级               | 五级  |



## 1.5 设计方案

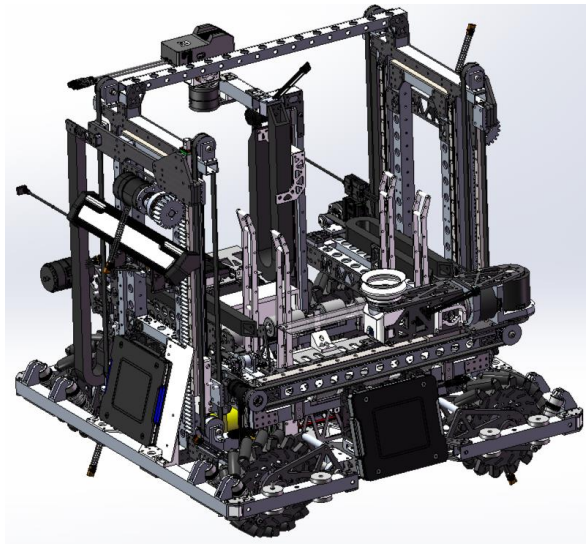


图 1 工程机器人

### 1.5.1 机械结构设计

#### 1. 底盘结构与轮组

该工程机器人采用麦克纳姆轮底盘，四轮支撑点构成  $445 \times 380 \text{mm}$  矩形，在保证底盘主行进方向的通过性（接近角  $40^\circ$ ，通过角  $40^\circ$ ）的同时使侧向支撑距离更大，可以满足底盘通过性与平稳性的要求；使用铝方管夹板栓接成底盘框架，结构简单且强度高，刚度大。

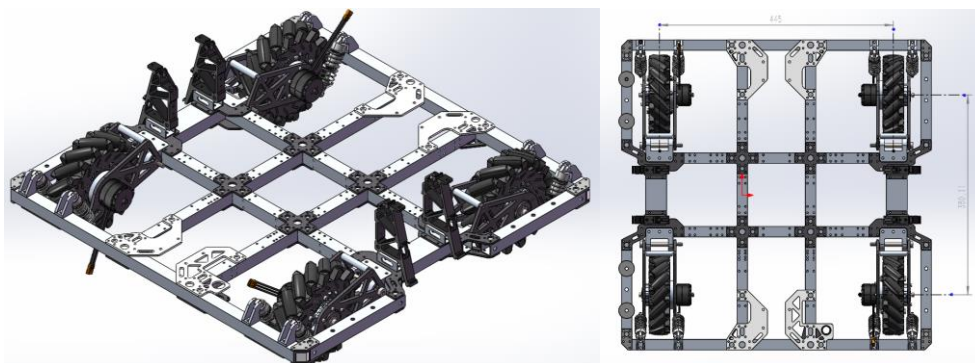


图 2 底盘框架

悬挂结构为独立纵臂悬挂，底盘框架外圈承载，上层执行机构的重力传递路径短，支撑刚度大；且该结构能有效降低底盘高度，增加了升降机构的的活动空间，使吸盘能够降低至吸取地面矿石的高度；框架对避震器保护良好，避震器不会受到来自地形、弹丸或是其他机器人的横向撞击。



图 3 悬挂

轮组采用模块化设计，在 Hexroll 麦轮成品辊子的基础上自行设计碳纤维板材轮毂与内部轴系结构，将 3508 电机减速箱嵌入轮内，大大减小了轮组的体积；且设计双端支撑避免电机输出轴受弯，以提高电机输出效率并延长减速箱的使用寿命。轮组容易独立拆换，维护便利。

## 2. 执行机构

该工程机器人主执行机构共有 6 个自由度，为串联“3P3R”机构，由升降机构、伸出机构、横移机构以及末端三轴“小臂”组成。

升降机构为同步带二倍行程机构，第一级（图 5 绿色部分）升降由齿轮齿条驱动，第二级（图 5 红色部分）升降总行程为 666mm。两组对称的机构形成龙门架形式，机构刚度大。齿条采用 7075 铝合金，表面硬质氧化，重量轻，硬度高，强度大，保证使用寿命。齿轮附近使用滑块与导轨限制其与齿条间的距离，以避免齿轮齿条啮合产生的水平径向力使框架在升降高度较低时发生相对变形而导致

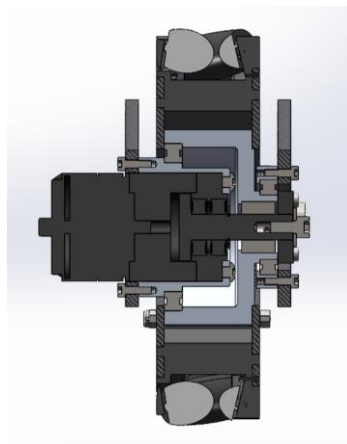


图 4 麦轮剖视图

的脱齿。

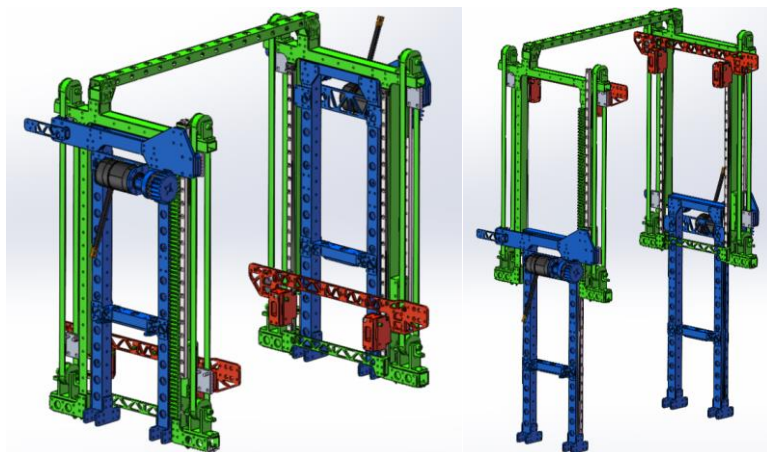


图 5 升降机构

伸出机构由同步带驱动，行程为 317mm。其移动副由两组平行的滑块（MGN9C）导轨（MGN9）首尾相扣而成，其支撑长度大，结构刚度大，且伸出至最远端时图 7 示（图 6 红圈中）两个铝加工工件平面接触，形成支撑，使伸出机构末端下垂小，有利于保持空接高度优势。

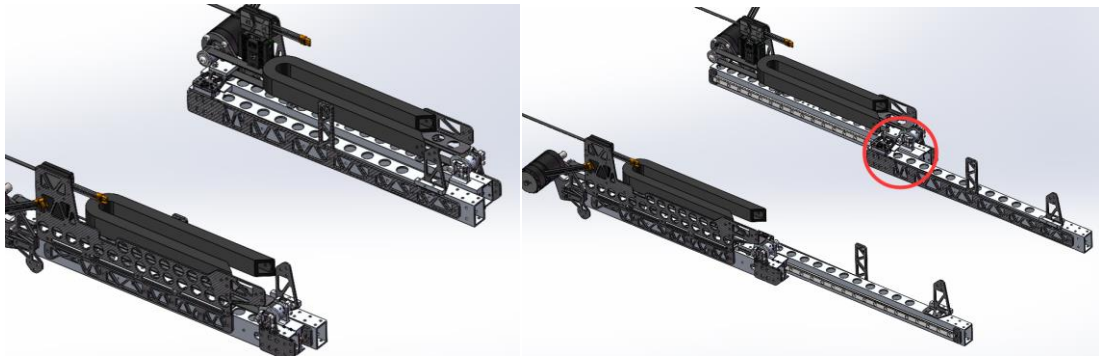


图 6 伸出机构

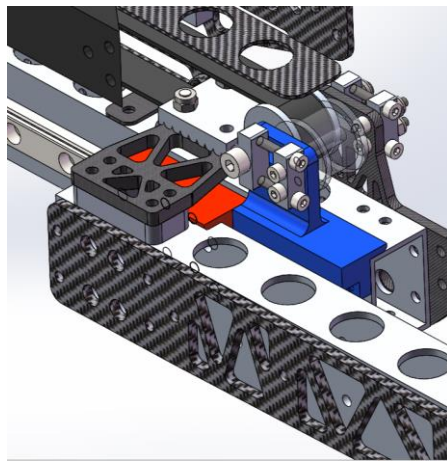


图 7 伸出末端支撑

横移机构由同步带驱动，行程为 268mm，可以配合末端三轴调整位姿并与升降机构、伸出机构联动控制吸盘上的矿石沿吸盘轴线方向移动，将矿石放入兑矿站。还可调整末端机构向矿仓放入矿石或取矿石时的水平位置

末端三轴（下称“小臂”）结构可以在机器人底盘与兑矿站不发生相对运动的情况下实现 1.3.2 中所述兑换姿态，且由于绕水平轴 R2 旋转结构的半径足够小，不需要复杂的限位就能在不超尺寸的情况下保证在空接姿态时吸盘顶面高度尽量大，实际空接高度可达 987mm 以上（计入末端下垂）；同时也能使空接姿态下吸盘轴线离车体尽量远，实际可达 465mm（吸盘边缘 498mm）以上；末端使用单个 HB63 硅胶风琴吸盘，矿石下落过程中与吸盘间能保持足够长的密封时间使其内部达到足够大的负压。综合上述三点，该工程机器人能够实现稳定空接。R1 与 R2 由达妙 GM4310 电机驱动，该电机内置双编码器，故这两个轴不需要设计初始化限位；在 R3 轴系使用了旋转气接头，吸盘可以相对气管无限周转动，故也不需要初始化限位，这为小臂的设计带来极大便利。小臂内嵌一个工业相机，其视野宽阔，视角可随小臂运动调整，可以实现视觉辅助兑矿（取矿）。

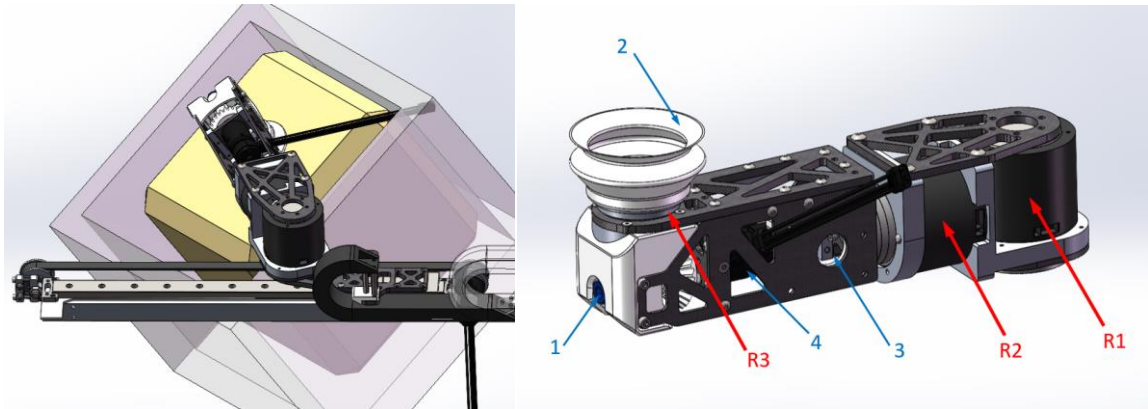


图 10 横移机构与小臂

[1]旋转气接头 [2]硅胶风琴吸盘 [3]工业相机安装位置 [4]2006 减速电机

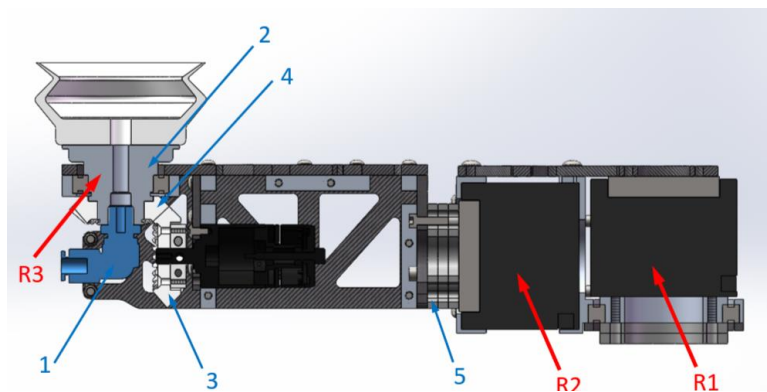


图 9 末端三轴剖视图

[1]旋转气接头 [2]自制铝吸盘座 [3],[4]PLA 打印锥齿轮 [5]调节垫板



图 8 旋转气接头

该工程机器人储矿结构中包含一组二自由度转矿机构，由轴线相互平行的两组独立驱动的滚筒组成，在主执行机构取/放矿姿态下，转矿机构轴线与吸盘轴线垂直。转矿机构与 R3 轴配合能够调节储矿结构中任意朝向的矿石达到所需的朝向。若转矿机构调整矿石朝向至其一个面达到水平，则转矿机构可调整该矿石竖直方向的位置。转矿滚筒由 PLA 打印轮毂通过胀紧套连接在钢轴上组成，轮毂外圈手工包覆 3M 海绵胶。该结构制造容易、价格低廉、调整简单、拆换方便，容易实现稳定的转矿效果。

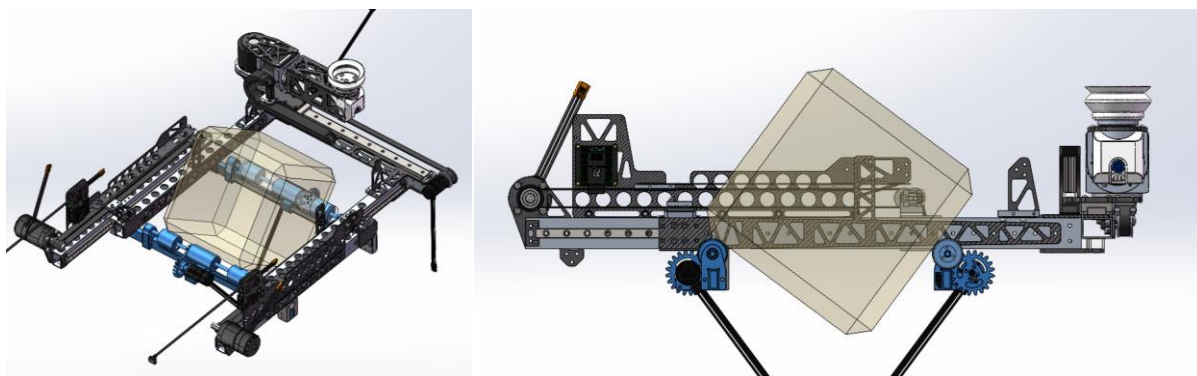


图 11 转矿机构



图 12 图传升降云台

该工程机器人的图传模块安装与一个三自由度（PRR）云台上，升降行程 330mm，Yaw 轴范围为  $(-90^\circ, +180^\circ)$ ，Pitch 轴范围为  $(-45^\circ, +25^\circ)$ ，操作手可以调整云台高度与朝向以获取良好视野。实际装配时图传下方安装减震球，以减小通过起伏路段时车体剧烈抖动对操作手的影响。

### 3. 硬件与线路布置

底盘上用板材搭建硬件仓，其内部集成包括电源管理模块、开发板 A 型、继电器、电磁阀、分电板等主要硬件，硬件仓四周均留有出线口。所有电气线路接口均采用热熔胶、粘土胶包覆作防松处理；对需要经常换修或相对不重要的硬件，采用魔术贴粘接在合适位置，并用扎带固定；对于 miniPC 等重要硬件，其安装采用橡胶垫圈、减震球等一系列减震处理；对于场地交互模块，使其背面预覆铝箔并安装于整块碳纤维板材上，与车架导通，以达到电磁屏蔽效果；使用无刷气泵，便于电控调节且能避免有刷电机产生的过强电磁干扰。

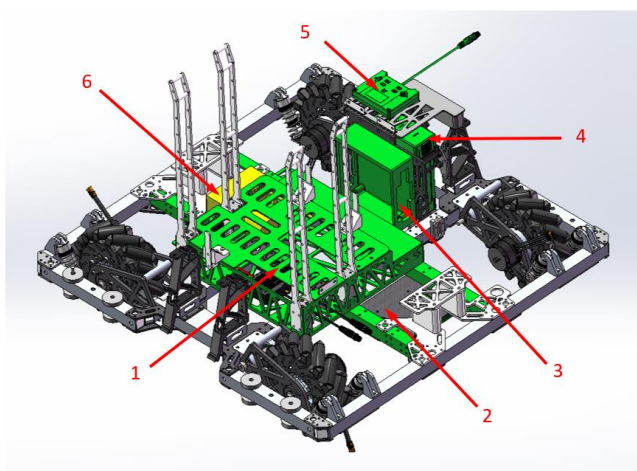


图 13 底盘硬件布置

[1]硬件仓 [2]场地交互模块安装板（碳纤） [3]PLA 打印  
NUC 外壳 [4]电池 [5]主控模块 [6]无刷气泵

电气线路通过主执行机构三个移动副的拖链逐级到达末端三轴。线路总长度较大，使用屏蔽线避免控制信号受到干扰；气管外径由 10mm 至 6mm 至 4mm 逐级递减，维持足够大有效通径使吸盘内真空度能够快速达到要求。图 14 所示绿色部分为电气元件与线路布置位置。

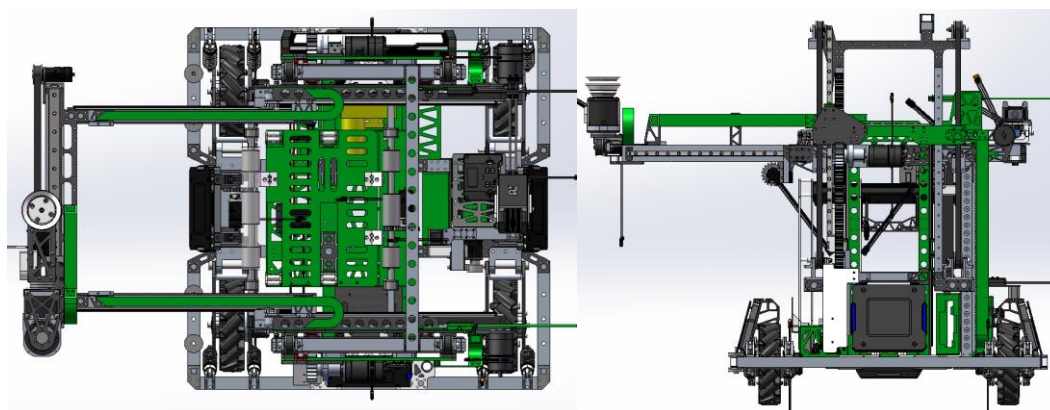


图 14 电气元件与线路布置

#### 4. 核心零件的有限元分析、静力学分析

### 有限元分析举例

为降低整车重心避免倾倒，主执行机构上层需减重，通过 Solidworks 内置的有限元分析功能可以得到设计参考；又由于主执行机构受循环载荷（通过起伏路段）、动载荷与冲击载荷，需要对重要零部件作安全因数校核。

如图 15 上所示拓扑优化结果类似于等强度设计结果，为设计制造方便，参考拓扑优化结果与等强度设计，对该板材进行修改，最终得到图 15 下所示形状，在满足使用要求的情况下减少超过 50%材料用量。

### 静力学分析举例

工程机器人在执行空接动作时，其横移机构导轨将承受冲击扭矩，为结构薄弱点，需要对其进行简单的估算并对滑块与导轨选型、校核。

矿石质量最大约为  $m=700g$ ，取其下落加速行程为  $h=200mm$ ，取冲击载荷作用线与校核点之间的距

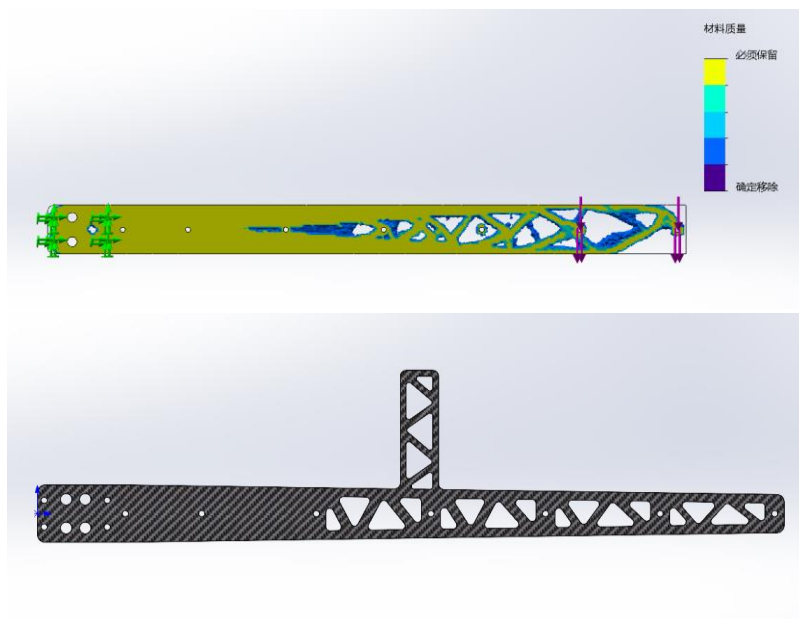


图 15 伸出加强板拓扑优化

离为  $L=220mm$ ，依据经验，空接姿态吸取矿石的静挠度可取：

$$\delta_s = 12mm$$

则横移滑块处冲击扭矩满足：

$$M_d = \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\delta_s}} \right) mgL = 10.35N \cdot m$$

由于该处受力情况复杂且为重要结构，取安全因数[S]=10.

参考上银导轨产品参数，选择 MGW9 导轨与两个 MGW9H 滑块，滑块抗扭静额定载荷为

$$M_0 = 54.54N \cdot m$$

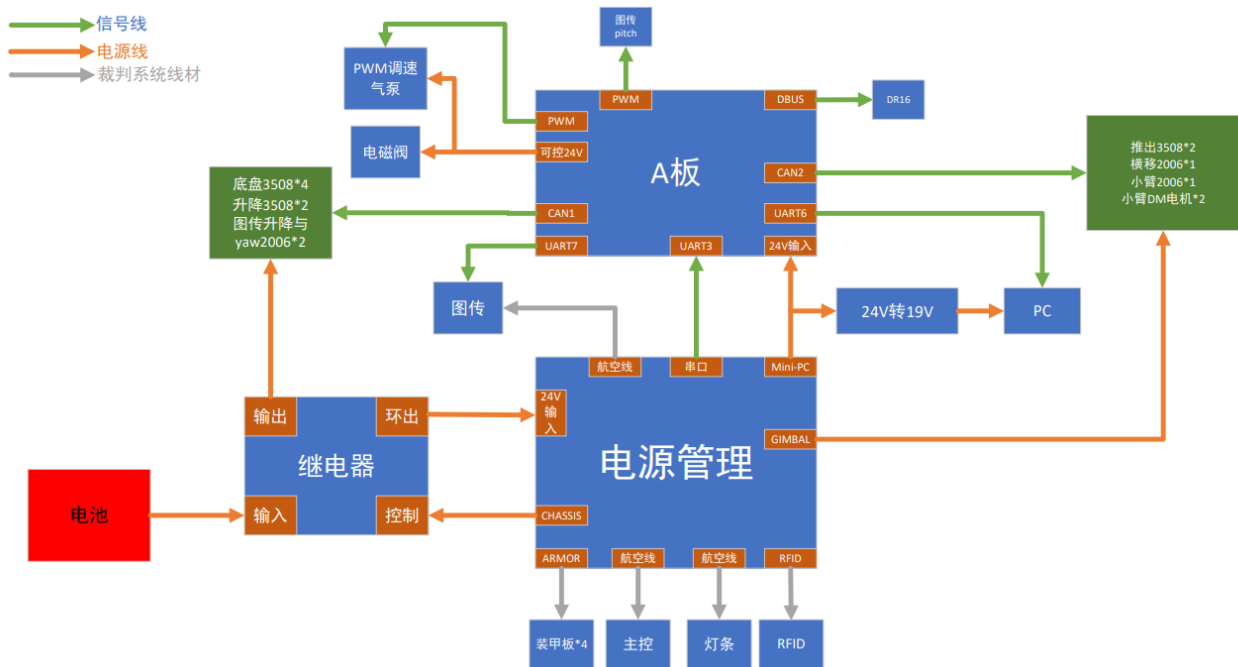
安全因数：

$$S_s = \frac{2M_0}{M_d} = 10.5 > [S]$$

故在横移机构采用 MGW9 导轨与两个 MGW9H 滑块满足强度要求。

### 1.5.2 硬件设计

整机硬件方案框图



### 1.5.3 软件设计

机器人电控代码使用 STM32CubeMX 生成，基于 Makefile，在 VSCode 进行编译，使用 Ozone 调试。代码主要可分为 BSP (Board Support Package)、HAL (Hardware Abstraction Layer)、APP (Application) 三层，实现了面向对象、耦合度低、易于维护的机器人系统架构。

BSP 层即板级支持包层，对 STM32CubeMX 生成的 HAL 库函数进行封装与映射。HAL 库函数只在本层出现，当更换主控板信号时修改此层即可，不需要对其它层进行修改。

HAL 层即硬件抽象层，采用面向对象的方式，将机器人使用的遥控器、各类电机等外设进行封装，提供 APP 层控制这些外设的函数接口。

APP 层即应用层，在工程机器人中包含 cmd、chassis、grab、rotation 与 view 五个模块。其中，cmd 模块进行机器人指令的发布，如底盘速度、升降高度等。chassis、grab、rotation 与 view 分别控制底盘、取矿机构、转矿电机与图传电机。以上四个模块对 HAL 库中的外设进行实例化，直接调用函数接口进行



具体的控制。不同模块之间通过 pub-sub 消息机制进行通信。

### 1.5.3.2 运行流程

### 1.5.3.3 重点功能

#### (1) 逆运动学解算

工程机器人使用“3P3R”构型，故可直接将预期姿态的 3 个角度对应到小臂 3 个电机的位置。姿态控制有两种模式：六自由度分别控制、末端姿态控制。接下来将详细叙述末端姿态控制的解算。下文分别称从横移到小臂末端的电机为 yaw、pitch 及 roll 电机。

若末端只平移而不旋转，可直接通过升降、推出、横移机构的运动实现，三自由度小臂的姿态不需要进行改变。

若末端只旋转而不平移，小臂各电机相对初始位置角度 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 即末端角度 $\psi_{ref}, \theta_{ref}, \varphi_{ref}$ 。利用 DH 法，得到小臂的 DH Table:

| i | $a_i$ | $\alpha_i$       | $d_i$ | $\theta_i$ |
|---|-------|------------------|-------|------------|
| 1 | 0     | $-\frac{\pi}{2}$ | 0     | $\theta_1$ |
| 2 | 0     | $\frac{\pi}{2}$  | $d_2$ | $\theta_2$ |
| 3 | 0     | 0                | $d_3$ | $\theta_3$ |

由 DH Table 可得到关节之间的齐次变换矩阵

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

则小臂基座到末端的齐次变换可表示为 ${}^0T = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3$ 。由此可得末端相对基座位移

$${}^0p_x = d_3 \cos\theta_1 \sin\theta_2 - d_2 \sin\theta_1, \quad {}^0p_y = d_3 \sin\theta_1 \sin\theta_2 + d_2 \cos\theta_1, \quad {}^0p_z = d_3 \cos\theta_2$$

设末端预期位置为 $p_{xref}, p_{yref}, p_{zref}$ ，则推出、横移与升降机构位移分别为

$$p_{xref} - {}^0p_x, \quad p_{yref} - {}^0p_y, \quad p_{zref} - {}^0p_z$$

#### (2) 视觉辅助兑换与取矿

当视觉识别到特定目标（兑换站、金矿特征）时，将传回目标相对于相机的 xyz 坐标及角度变换（rpy 角）。由于五级兑换时兑换站可能出现 yaw 较大的姿态，因此需要在小臂处于任意姿态下进行识别。相机随 yaw, pitch 转动而不随 roll 转动，可建立 DH Table:

| $i$ | $a_i$  | $\alpha_i$       | $d_i$  | $\theta_i$                 |
|-----|--------|------------------|--------|----------------------------|
| 1   | 0      | $-\frac{\pi}{2}$ | 0      | $\theta_1$                 |
| 2   | $a'_2$ | $\frac{\pi}{2}$  | $d'_2$ | $\theta_2 - \frac{\pi}{2}$ |

得到的齐次变换矩阵 ${}^{0}_{Cam}T$ 表示小臂基座到摄像头的变换。再令 ${}^{Cam}_{Tar}T = f(x, y, z, \psi, \theta, \varphi)$ 为相机发回姿态得到的齐次矩阵， ${}^{Bas}_0T = \begin{bmatrix} E_{3 \times 3} & p_{fab} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 表示平移机构的变换，其中 $p_{ref} = [p_{xfab} \ p_{yfab} \ p_{zfab}]^T$ 即当前反馈的位置。

此时，由 ${}^{Bas}_{Tar}T = {}^{Bas}_0T {}^{0}_{Cam}T {}^{Cam}_{Tar}T$ 可计算出车体原点到目标位姿的变换，并求得位姿

$${}^{Bas}_{Tar}x = {}^{Bas}_{Tar}T_{14}, \quad {}^{Bas}_{Tar}y = {}^{Bas}_{Tar}T_{24}, \quad {}^{Bas}_{Tar}z = {}^{Bas}_{Tar}T_{34}$$

$${}^{Bas}_{Tar}\varphi = \text{atan2}({}^{Bas}_{Tar}T_{21}, {}^{Bas}_{Tar}T_{11}), \quad {}^{Bas}_{Tar}\theta = -\text{asin}({}^{Bas}_{Tar}T_{31}), \quad {}^{Bas}_{Tar}\psi = \text{atan2}({}^{Bas}_{Tar}T_{32}, {}^{Bas}_{Tar}T_{33})$$

考虑到小臂构型限制，yaw 电机只能从初始位置开始向正方向运动，因此当兑换站 yaw 为正时，yaw 电机角度应在 $(\frac{\pi}{2}, \pi)$ ，而 pitch 为正值。为成功将矿放入兑换站，解算角度到关节电机角度的转换关系如下：

$$\begin{cases} \theta_{1ref} = -\psi_{ref}, & \theta_{2ref} = -\theta_{ref} - \frac{\pi}{2} \quad (\psi_{ref} < 0) \\ \theta_{1ref} = \pi - \psi_{ref}, & \theta_{2ref} = \theta_{ref} + \frac{\pi}{2} \quad (\psi_{ref} \geq 0) \end{cases}, \quad \theta_{3ref} = -\varphi_{ref}$$

平移机构位置 $p_{xref}, p_{yref}, p_{zref}$ 由(1)中逆解算得到。

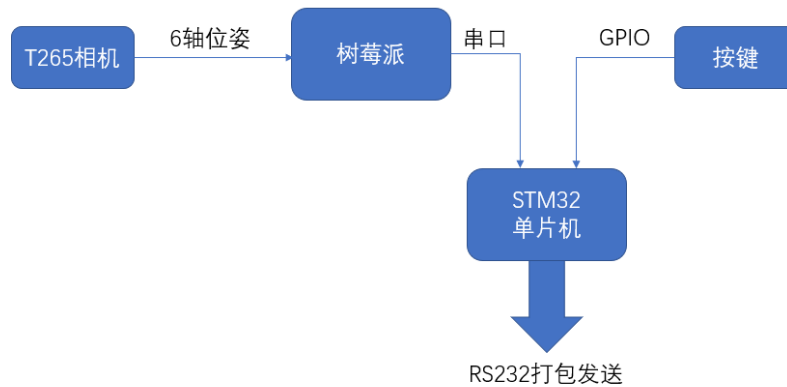
### (3) 自定义控制器

自定义控制器的目的是可以在同一时间控制多个自由度，从而加快兑矿的速度。受南京航空航天大学长空御风战队的启发，我们使用 Intel T265 作为空间中 6 轴位置和姿态的反馈器，同时使用树莓派和 STM32 单片机作为运算中心。



图 1.5.3 自定义控制器外观

T265 采用了 Movidius Myriad 2 视觉处理单元 (VPU)，V-SLAM 算法直接在 VPU 上运行，可以输出空间中的位置和速度。同时上面搭载 BMI055，反馈三轴姿态。在树莓派上运行 ROS2 程序获取到 T265 反馈的速度和姿态，速度积分得到位置。STM32 单片机作为嵌入式设备，获取自定义控制器上的按键状态（不同按键映射机器人的不同功能），同时接受由树莓派传输过来的数据，并通过 RS232 打包发送。



该方案存在 3 个关键的技术问题：（1）相机类传感器常见的视觉识别出错，使得反馈的位置发生错误（2）人手控制自定义控制器移动容易造成非期望移动轴的抖动。（3）由于采用速度积分得到位置，而人手的控制原点和 T265 传感器原点并不统一，需要进行变换。

对于问题（1），我们设定了监测机制。我们实时监测反馈速度的大小。当速度在一定时间内保持不变时视为相机处于静止状态，若其大于某一阈值，则说明相机识别出错，将触发 ROS2 中中断回调程序，重启相机 USB 口，从而重新初始化相机。

对于问题（2），在进行均值滤波的基础上，监测 3 轴速度的大小。通过算法判断主动轴和从动轴，并将从动轴的速度进行过滤。这样可以使得在进行位置和姿态的微调时，避免其他轴带来的移动，从而使得操作的手感更佳。

对于问题（3），需要将传感器反馈的速度解算到人手控制的中心。根据齐次变换，可以得到刚体上一点  $p$  在随体坐标系和参考坐标系下的坐标  $p^1, p^0$  具有如下关系：

$$\begin{bmatrix} p^0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1^0 & d_1^0 \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p^1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

因此，点  $p$  在参考坐标系下的坐标可以写作：

$$p^0 = R_1^0 p^1 + d_1^0$$

对两边求导可以得到：

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{p}}^0 &= \dot{R}_1^0 \boldsymbol{p}^1 + \dot{\boldsymbol{d}}_1^0 \\ &= S(\boldsymbol{\omega}_{0,1}^0) R_1^0 \boldsymbol{p}^1 + \dot{\boldsymbol{d}}_1^0 \\ &= \boldsymbol{\omega}_{0,1}^0 \times \boldsymbol{p}^0 + \boldsymbol{v}\end{aligned}$$

其中,  $\boldsymbol{\omega}_{0,1}^0, \boldsymbol{v}$  分别为刚体运动的角速度和随体坐标平移的速度。通过该公式, 即可将获取人手处正确的速度。

## 1.5.4 算法设计

## 1. 功能简介与 pipeline

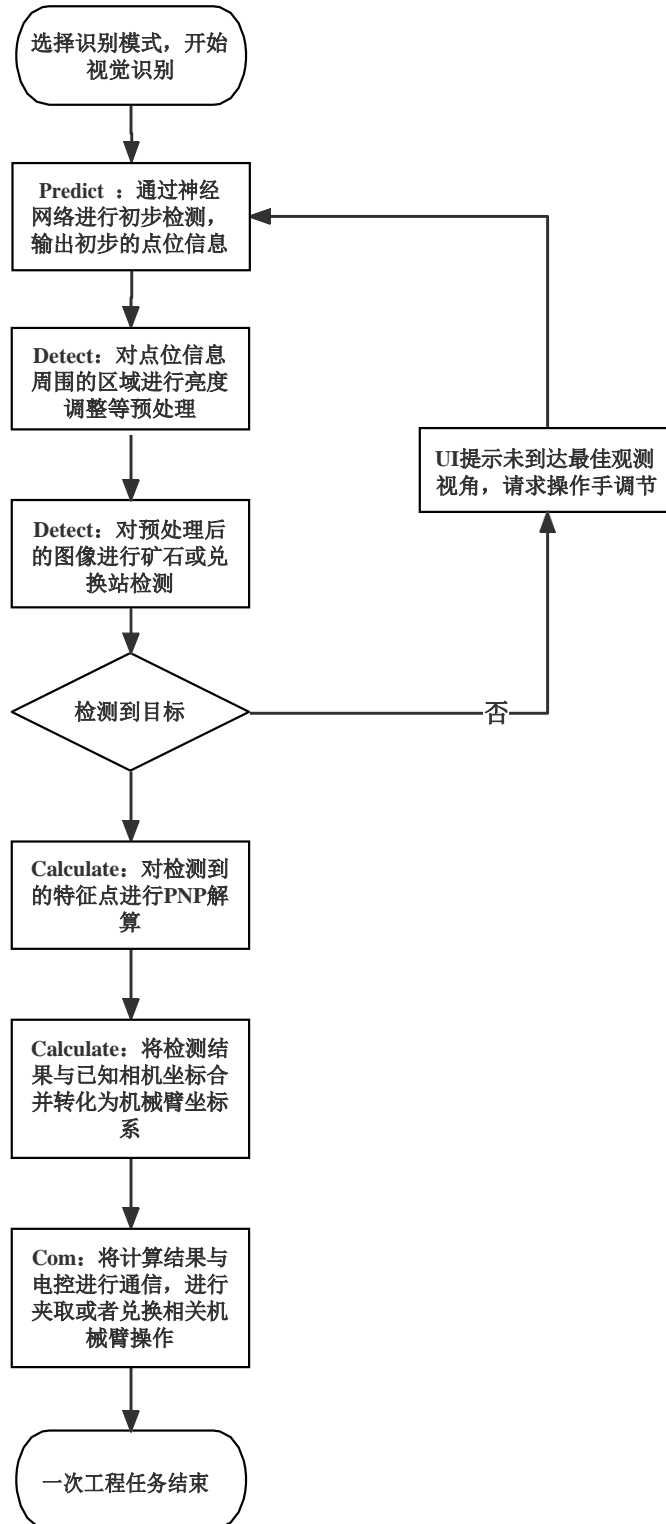


图 1.5.4 - 1

整个算法流程主要分为五个部分，分别为 Sensor、Predict、Detect、Calculate、Com。

Sensor 主要负责处理传感器数据，并负责内录相关工具；

Predict 负责使用神经网络进行金矿的初步检测；（在当前版本中由 Minenetdetector 完成）

Detect 负责进行大资源岛、兑换站的识别；

Calculate 负责对 Detect 的识别结果进行 PNP 解算，计算机械臂目标位姿；

Com 负责按照指定格式与电控进行控制与对接。

## 2. 重要算法原理阐述、公式推导

### 金矿识别算法：

金矿识别采用神经网络先识别，传统视觉后纠正的算法。在总体步骤上首先获取到神经网络的识别结果，以一个面为例，神经网络识别结果将包含四个角点。随后在四个角点附近形成四个 ROI 区域，每一个区域进行处理每一个区域中应当包含可置信度最高的一个完整角点，见图 1.5.4-2。

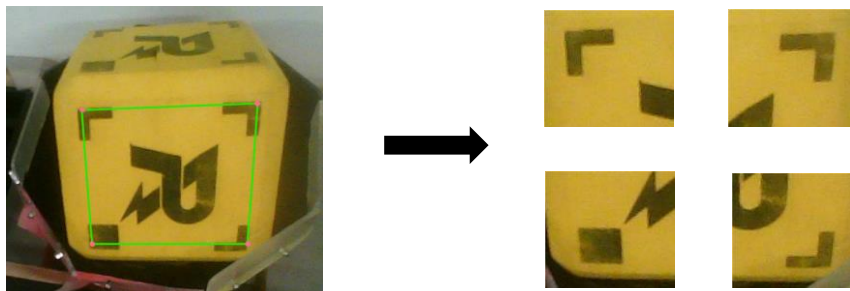


图 1.5.4 - 2

在筛选角点上我们采用如下方式：

1. 首先由于金矿在相对稳定的照度下，黄色区域较为亮，而角点的黑色区域较为暗，第一步使用转灰度图进行二值化的方法，获得黑色区域，见图 1.5.4-3。
2. 获得黑色区域之后利用旋转矩形面积、轮廓面积在旋转矩形面积中所占的比例、旋转矩形长宽比等多个筛选条件筛选得到角点。具体筛选上旋转矩形的面积过大或过小均不符合筛选条件；而旋转矩形的长宽比不应当过于小，宽比长应当大于 0.3 为宜；而轮廓面积在旋转矩形面积中所占的比例也不应当过小以大于 0.4 为宜。



图 1.5.4 - 3

3. 进一步进行轮廓的寻找，对寻找到的轮廓进行霍夫直线变换寻找到置信度较高的直线。由于前方寻找 ROI 区域时使用的是矩形进行框选，因此处属于边缘的暗色部分在寻找直线的时候将会出现置信度极高的明显直线，这样的边缘虽然含有直线，但通常而言并不是我们所需要的。因此可以通过判断该条线段的其实坐标  $xy$  值是否和我们筛选的 ROI 区域的  $xy$  值重合，从而判断该条直线是否位于边界进而将该轮廓进行排除，详见图 1.5.4 - 4。



图 1.5.4 - 4

4. 除此之外中间 R 标产生的轮廓通常也容易被误识别为角点，但其轮廓外观较为复杂，可以通过轮廓周长比与外接矩形的周长比进行对比，从而将这些轮廓周长过长的轮廓进行排除，详见图 1.5.4 - 5。

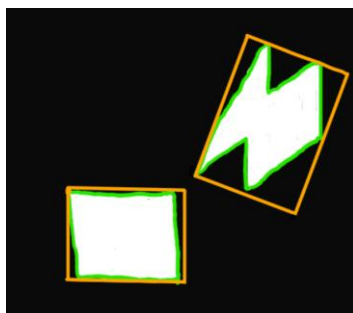


图 1.5.4 - 5

5. 在经过一系列的筛选之后此时保留下来结果较少若一个区域中仍然产生多个备选答案则一般认为离神经网络识别的四个角点中心点（即四个角点  $xy$  坐标的平均值）较远者通常为错误的轮廓，而离本身角点较近的轮廓为正确结果。

6. 最后，若一个区域内仍然产生多个备选答案，四个区域我们至多保留  $2 \times 2 \times 2 \times 2$  即 16 个备选答案，此时一般而言最接近正确答案即真正的四个角点其构成的外接多边形面积和其构成的最小外接矩形面积通常而言是最为接近的，因此此时可以遍历这 16 个结果利用外接多边形面积与最小外接矩形面积之比得出最佳答案。

#### 兑换站识别算法：

兑换站识别采用直接的传统视觉识别方案。

由于兑换站的发光特征较为明显而且其周围环境中并没有明显的额外光源干扰，因此倘若能够从较为正的视角观察兑换站则可以获得较为明显的特征。

1. 将兑换站的图像转换为 HSV 通道标示，采用二值化的方式获得其发光部分，参数可根据红色、蓝色的 HSV 标准值并结合实际情况进行微调，优良条件下的二值化效果详见图 1.5.4 - 6。

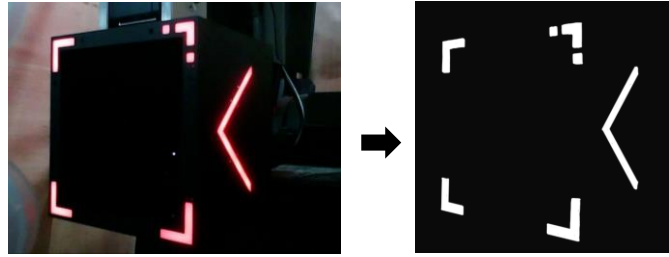


图 1.5.4 - 6

2. 对旋转矩形长宽比、旋转矩形面积、轮廓面积与旋转矩形面积之比、该轮廓 G 通道的平均值四个维度进行筛选。对于旋转矩形长宽比过大或过小，通常为兑换站的细长灯条并非真实的兑换站引导灯，从而进行排除。通常情况下旋转矩形的长边与宽的比例不会超过 4。而旋转矩形的面积则是基于相对固定的视角下兑换站 L 型灯条所占据的具体面积通常情况在 720P 的分辨率下该面积不会超过 20000 个像素，也通常会大于 150 像素。而轮廓面积与旋转矩形面积之比，通常不会超过 0.9，L 型灯条通常会留有一定的面积余地，和最小外接矩形并不会完全契合，从而排除掉那些相对偏向正方形或矩形的灯条。而场地上存在较为纯正的白光如兑换站的 R 标引导灯，G 通道平均值通常在 230 左右及其绿色通道相较于红色兑换站和蓝色兑换站都较高从而将其进行排除，标示结果见图 1.5.4 - 7。

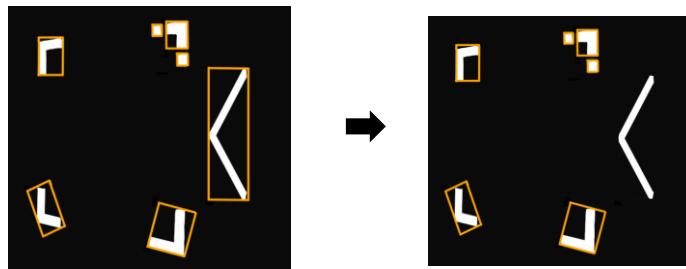
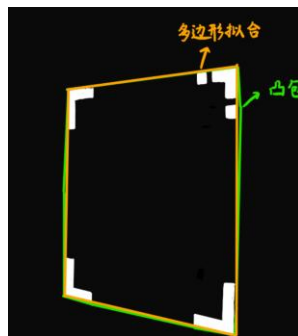


图 1.5.4 - 7



3. 针对上述找到的所有符合条件的 L 型角点进行逐个遍历，每四个为一组进行如下条件的判断：首先寻找该四个角点形成的凸包，并拟合该凸包的最接近的多边形，在一定的多边形拟合距离下，若拟合出的多边形不为四边形则不符合条件。在四个 L 型角点中，得到最小角点的轮廓面积，并做记录。由于正确的兑换站引导灯右上角的角点附近存在两个较小的正方形角点，同时该正方形角点的最小外接矩形面积应当小于右上角 L 型引导灯的轮廓面积（最小外接矩形面积最多为正方形角点面积的两倍，而 L 型引导灯的面积是正方形引导灯面积的三倍，进一步考虑透视变换多数情况下均符合条件），因此在形成的凸包内部寻找各轮廓的最小外接矩形，若寻找到的最小外接矩形面积小于四个 L 形角点中最小的轮廓面积则视为判定条件符合，否则认为是不合格组合。进一步，对该四个角点进行 PNP 解算，判断其  $raw$ 、 $yaw$ 、 $pitch$  是否符合规则手册规定，从而做进一步的筛选和排除（由于观测视角的原因，此处应留有一定的余



地，即略大于规则手册规定的角度，应在实际测试中测量其边界条件而确定）在所有的这些组合中，依旧得到其外接多边形与最小外接矩形面积最接近的四个 L 型角点组合即视为较为正确的答案，结果详见图 1.5.4 - 8。

图 1.5.4 - 8

### 3. 算法性能、优缺点分析、优化方案

在赛场正常环境下，光线条件较为纯净，金矿的识别算法处理效率约为 20fps，兑换站可达 60fps，满足工程取兑矿需求。在最坏情况下，即手动模拟存在大量干扰光源，兑换站识别可通过动态参数调整维持约 30fps 的识别效率。

算法整体的优点在于其具有较强的鲁棒性，针对不同场景下都有较好的识别效果。缺点在于其使用的传统视觉算法，不能很好地排除干扰，采用面积等多种筛选方式仍然无法准确过滤掉形状相似的光源，且不同观测视角下的图像变化具有多样性，需要进行严格的边界条件测试。

针对不同观测视角存在的图像变化问题，提出加入透视变换进行处理。优化方案如下，针对金矿而言（兑换站类似）由于正方形角点的特征最为明显，因此我们可以通过神经网络识别结果，获取其第二号角点（即正方形角点）附近区域得到正方形角点。根据其实际的尺寸和小正方形角点的四个点位置，得到透视变换的矩阵。利用该透视变换矩阵将一整张图片均可恢复到较为平整的状态，金矿了一整个面也将会更接近于正方形，从而有利于进行面积比例等多方面的筛选获得更加准确的答案。需要注意的是该方法使用时，要将正确的点映射到正确的位置上（即透视变换前后计算出来的结果均是基于当前图片进行计算，应将其及时地转回原始图像）。

#### 4. 算法库介绍与接口说明

算法的处理过程仅使用 OpenCV 与 Eigen 库进行图像处理与解算。

接口说明:工程视觉的完整流程封装在 EngineerCV 包中,各流程中所用的函数分别封装在 Sensor、Detect、Calculate、Com 类中。

在主函数中进行调用时,仅需初始化相应的类,利用 <Object>.run( ) 可运作各部分流程,各部分运作后可利用 <Object>.join( ) 即使各线程进行运作,最终完整运作整个工程视觉算法。

### 1.5.5 机器人操控说明

该机器人使用一键流程与视觉兑换为主要完成工作任务手段,键鼠操作基本的运动与转向,为每一电机运动保留了按键,确保视觉与一键流程失效时能够完成任务。

#### 1.5.5.1 基础运动键位

WSAD 控制底盘前后左右, Ctrl + WSAD 控制底盘慢速移动, Shift + WSAD 接触加速度限制运动。

鼠标移动 车体转动

Ctrl + Shift + W/S/A/D 将矿石上/下/前/后转动

Q/E 图传左/右转动 90 度, Shift + Q/E 图传俯/仰微调。(车体移动方向随视角改变)

Z / Ctrl + Z 升降机构降落/升起

X / Ctrl + X 推出机构收回/推出

C / Ctrl + C pitch 内翻/外翻 (相对车体)

V / Ctrl + V 横移机构右移/左移

Shift + V / Ctrl + Shift + V yaw 内翻/外翻 (相对车体)

R / Ctrl + R roll 正转/反转

Shift + 鼠标右键/左键 气泵关/开

鼠标滚轮 图传升/降

#### 1.5.5.2 一键流程键位

**G** 一键取小资源岛矿石

紧贴小资源岛,两次点按 **S** 向后移动 (或者 UI 对其矿石露出的部分);

按 **G** 启动后吸盘移动至银矿石正上方,真空泵开启;

点按鼠标左键确定后吸盘下降吸取矿石，根据计数器决定摆放位置以及转矿顺序。

### Ctrl + G 根据计数器从矿仓中取出矿石

按住 **Ctrl** 再按 **G**（防止单独按 **G**），吸盘朝内，转矿先将矿石向上转到无法转动（达到一个稳定态），再朝一个方向旋转至矿石立正；

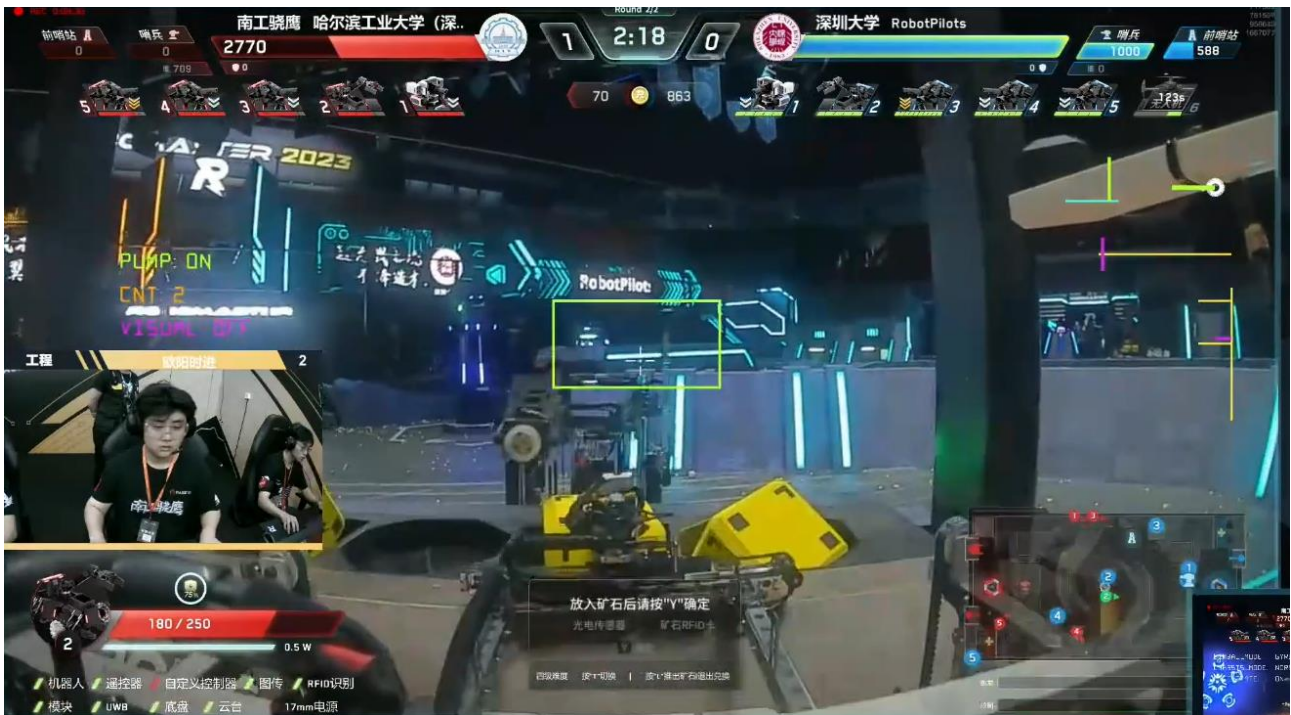
点按鼠标左键确认，推出收回，吸取矿石并 **pitch** 外翻，吸盘恢复水平。

### Shift + G （辅助）一键取大资源岛矿石

紧贴大资源岛，点按 **Shift + G** 后吸盘移动到矿石正上方；

2、4 号矿石可以直接点按鼠标左键确认吸取；

1、3、5 号矿石则需要先升降稍降，左右转动车体将矿石摆动至水平朝上再吸取。



图示：吸取 2、4 号矿石

### F 空接

车体紧贴大资源岛，点按 **F** 后图传升降升至最高，俯仰角变化，吸盘移动到矿石正下方；

点按鼠标左键确认后收回，根据计数器摆放矿石。

### Shift + F 取地矿

直接点按 **Shift + F**，视角提高到最高并略俯，移动底盘将吸盘置于矿石正上方；

点按鼠标左键吸取，按计数器摆放矿石。

**Shift + X** 启动视觉兑换，前提条件为手上有矿石，并且识别兑换框为 **Right**

先按 **B** 保证 **Yaw** 在初始位置，当图示紫色框与实际观测到兑换框姿态一致时，点按 **Shift + X**；

矿石此时移动到兑换框前，经过手动微调后长按 **Ctrl + Shift + G** 将矿石送入兑换框；

最后点按 **Shift +** 鼠标右键松开矿石，完成兑换。



**Ctrl + Shift + G**（长按）沿法线方向送入矿石

### 1.5.5.3 特殊按键

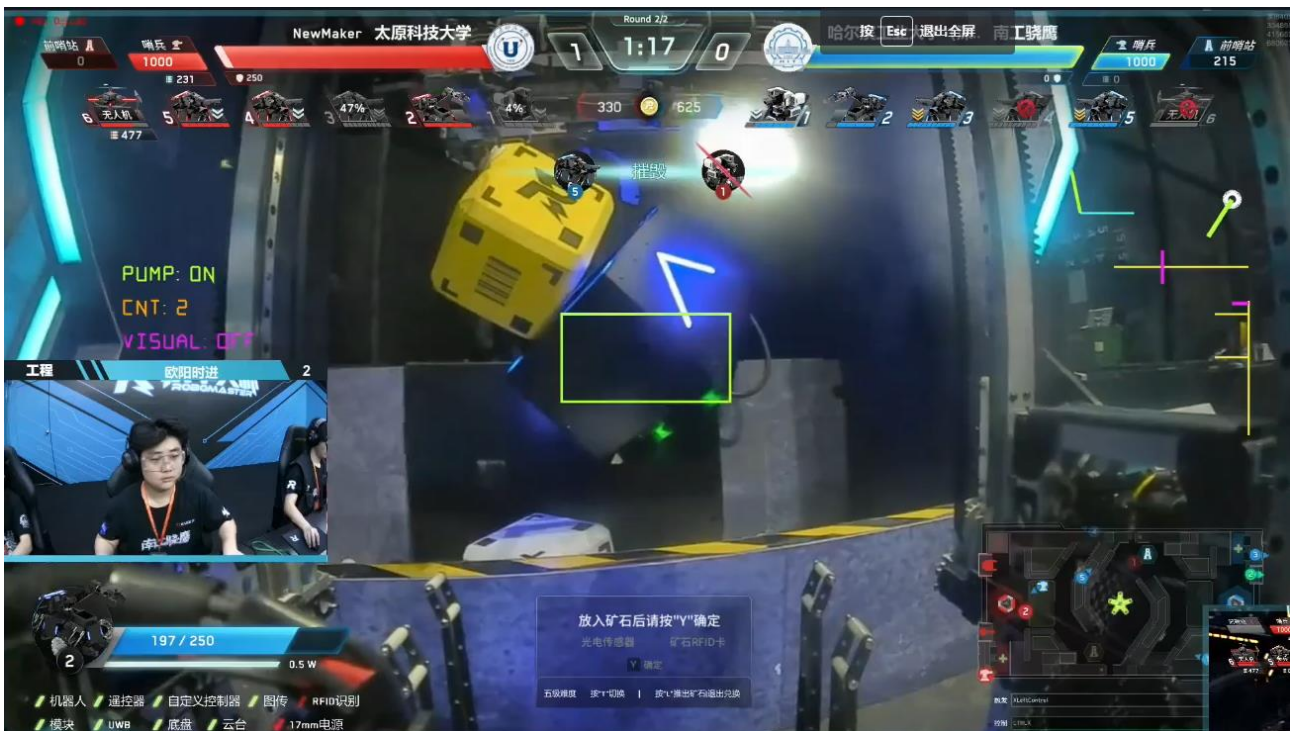
**B** 停止一键流程，机械臂姿态恢复初始位置，常用于误触或者流程出现异常如没吸上矿石，此时及时终止并重新启动，不浪费时间。

**Ctrl + Q/E** 计数器增/减 1，对应不同的一键流程，也可用于切换

**Ctrl + B** 长按 3 秒 一键初始化（被杀死断电后无法保证上电时单编码器电机初始化位置正确）

**Ctrl + Shift + X** 视觉重新启动，用于视觉离线情况下恢复使用。兑换框识别十秒钟后可以再次使用，金矿识别需等待至多一分钟。

### 1.5.5.4 UI 说明



左侧从上到下依次为：真空泵状态、计数器、视觉状态（OFF 离线 READY 在线 FIND 已识别可兑换）

右侧图形从上到下依次为：yaw 轴转动状态（机械臂相对于横移的角度）、pitch 角度、推出示意图、升降示意图（两条黄线中间为兑换框的 700-920 高度，方便视觉寻找兑换框）

中间为取银矿的引导框。

### 1.5.5.5 赛场注意事项

#### 初始化

升降、推出、横移均需推到最内进行初始化。

Pitch 和 Yaw 电机可以任意摆放，但不能太接近距离初始 180 度的位置，否则可能上电后会朝另一个方向转动导致线材扯断/结构损坏。

#### 兑换

相较于平时的实验室场地训练，场上无法听到真空泵等其他车体运动的声音，会对机器人运动缺乏部分感知，车体的摆动、冲撞会较难控制程度，兑换时矿石可能容易碰掉。因此，一方面在赛场上要注意，场下训练也要尽量只通过屏幕来获取信息。

## 1.6 研发迭代过程

研发过程中，不同阶段或者版本所完成的功能、发现的问题、问题定位分析以及改进解决方案说明。

以下格式仅作为参考，可自行更改格式。

### 1.6.1 前代工程记录

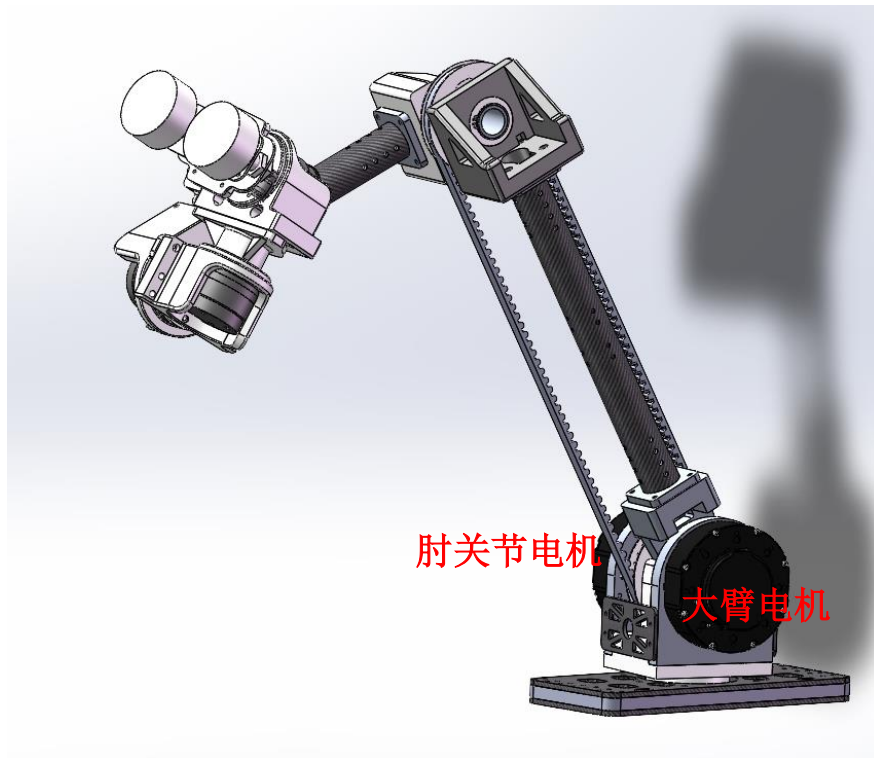
#### 1.6.1.1 前代工程整体机械结构设计说明

该工程机器人战术定位为高效的矿石取、兑机器人。根据这一需求，工程机器人需要具备在 E 点（E 点为矿石靠车体一平面的几何中心）在小资源岛的工作范围、兑换站工作范围内具有一定的三旋转自由度工作的能力。以广东工业大学 2021 赛季的升降-推出-横移加三自由度小关节的工作范围只能达到约为 70% 左右，所以我们选择了工作范围更大，初始体积也更小的六轴机械臂。

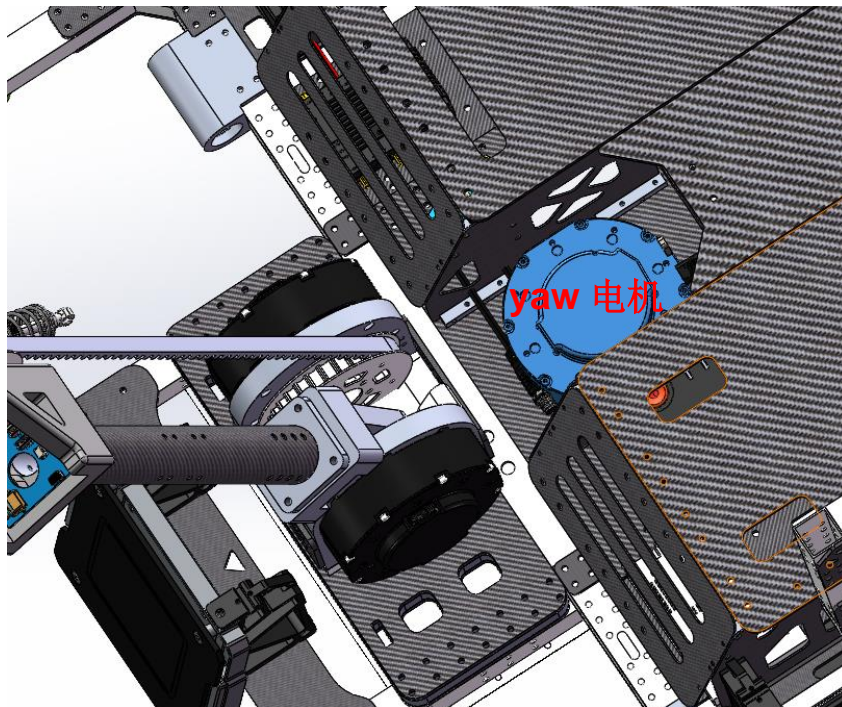
机械臂下三个关节决定工作位置，上三个关节决定工作姿态。为减轻大臂电机负载，我们将肘关节电机下移，通过同步带驱动。同步带驱动也可以减轻维护、更换电机的难度，所以我们将 yaw 轴电机挪动到底盘上表面，在底盘下表面通过同步带驱动机械臂。

在测试中发现对于肘关节电机的同步带传动中，在大臂运动时小臂会因为同步带产生相应的位移，导致需要在两个电机中加入运动补偿，同时肘关节的同步带传动因为同步带的旋转问题会导致齿形的啮合差值过大，很容易造成滑齿现象，在设计了一个滑车构型的轴承涨紧装置后，虽然对滑齿现象具有较好地改善，但是产生的弯矩对于大臂电机的负荷较大，产生的过热现象会更加明显，所以在后续版本中选用了齿形更大的 8m 同步带，有效的解决了这两个问题。

对于安装两个电机的安装座来说，采用电机外置的方法使得两关节的距离靠近，减少弯矩的影响，同时达到不错的散热效果，并且在各电机连接处均加入了 6809 的深沟球轴承，使得对于电机内部的齿轮破坏率降低，对电机产生一定的保护作用。



六轴机械臂



Yaw 电机安装示意

在末端执行器上，由于高速度高精度响应的需要以及机械臂所带来的大范围尺寸需求，同时在本赛季兑换站改为机械臂构型后，传统的夹爪式取矿机构已经无法很好的将矿石放入兑换框中，所以我们放弃了更重也更长的传统夹爪，选择了和矿石只有一个接触面的更轻的吸盘。在吸盘的选型上，我们参考了西安交通大学在上赛季技术答辩分享会<sup>[3]</sup>上的经验，选择了风琴型的硅胶吸盘。吸附力更强，并且也能够吸取矿石的斜面。

| 吸盘种类        | 特点                            |
|-------------|-------------------------------|
| 硅胶吸盘        | 吸附能力强，对表面适应性更好，柔软易形变，易变性，寿命较短 |
| 丁腈橡胶吸盘      | 对表面形状适应性中等，寿命长，形变小，能够承受一定弯矩   |
| 硅胶吸盘（加海绵垫圈） | 对粗糙表面适应性好，柔软易形变，易变性，寿命较短      |

| 吸盘类型 | 特点                |
|------|-------------------|
| 平型   | 工作面平整无形变          |
| 平型带肋 | 工件表面易变形           |
| 深型   | 工件表面为曲面           |
| 风琴型  | 没有安装缓存的空间，吸附表面为斜面 |

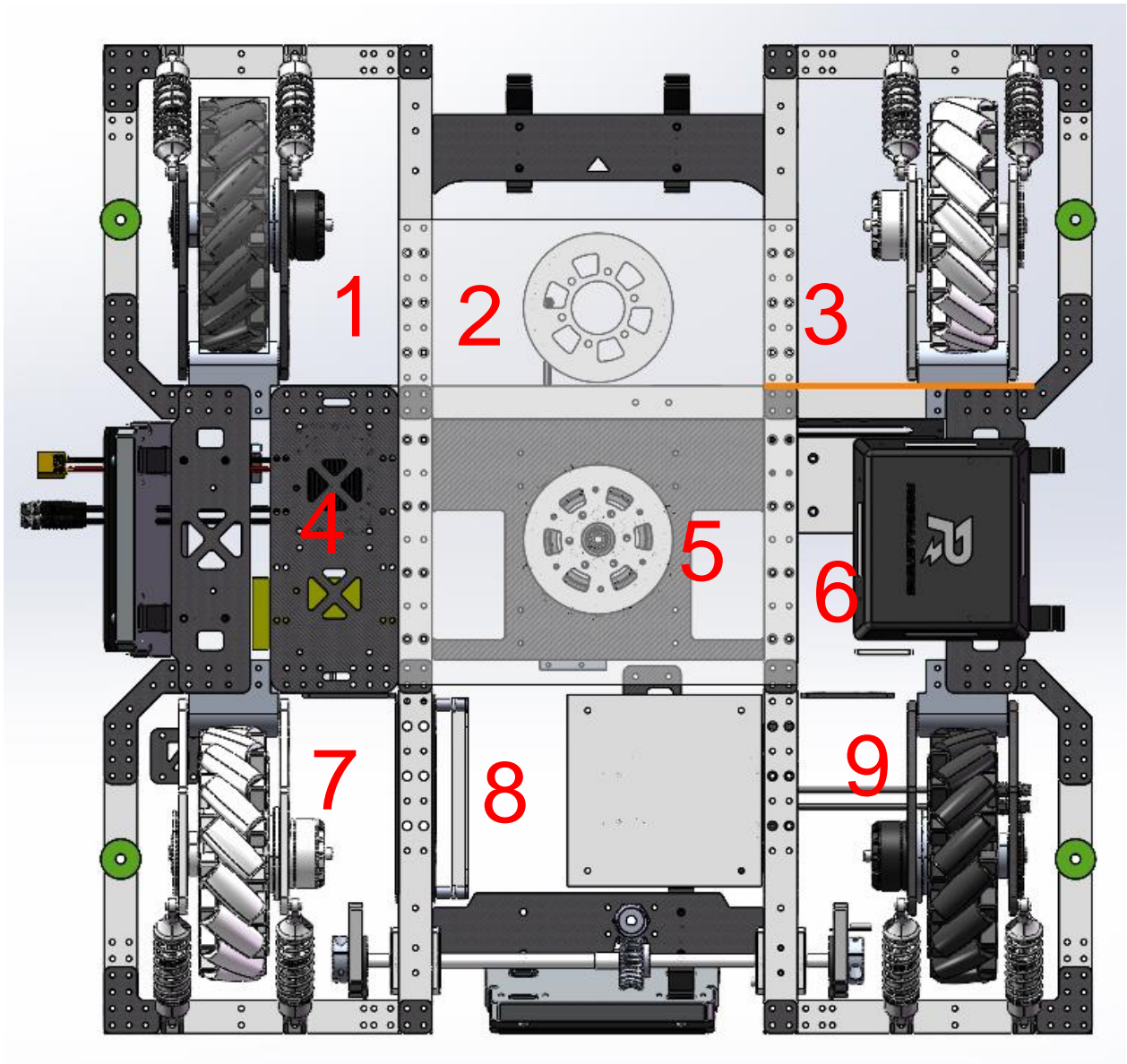
西安交通大学的吸盘分享

对于小资源岛的银矿石，由于此类矿石的位置固定性，吸盘吸取的面基本为银矿石正面偏上部分，所以在视觉和 UI 辅助完成对位后可采取固定路线对该矿石进行吸取。达到较为高效的吸取流程。

对于大资源岛矿石，考虑到本赛季的第一颗金矿石具有额外的金币加成，所以对于第一颗金矿石的争取也是需要的，由于第一颗金矿石固定的位置，我们可以极大程度的依靠 UI 辅助定位，并且采取空接的模式抢夺金矿石，之后的几颗金矿视情况而定，因为空接操作的存在，所以底部异型的掉落框很大程度上不会造成影响，如果是拾取异型框内的金矿石，那我们将通过视觉识别金矿石特征部位，解算出相应的角度，从而对机械部进行控制取矿。

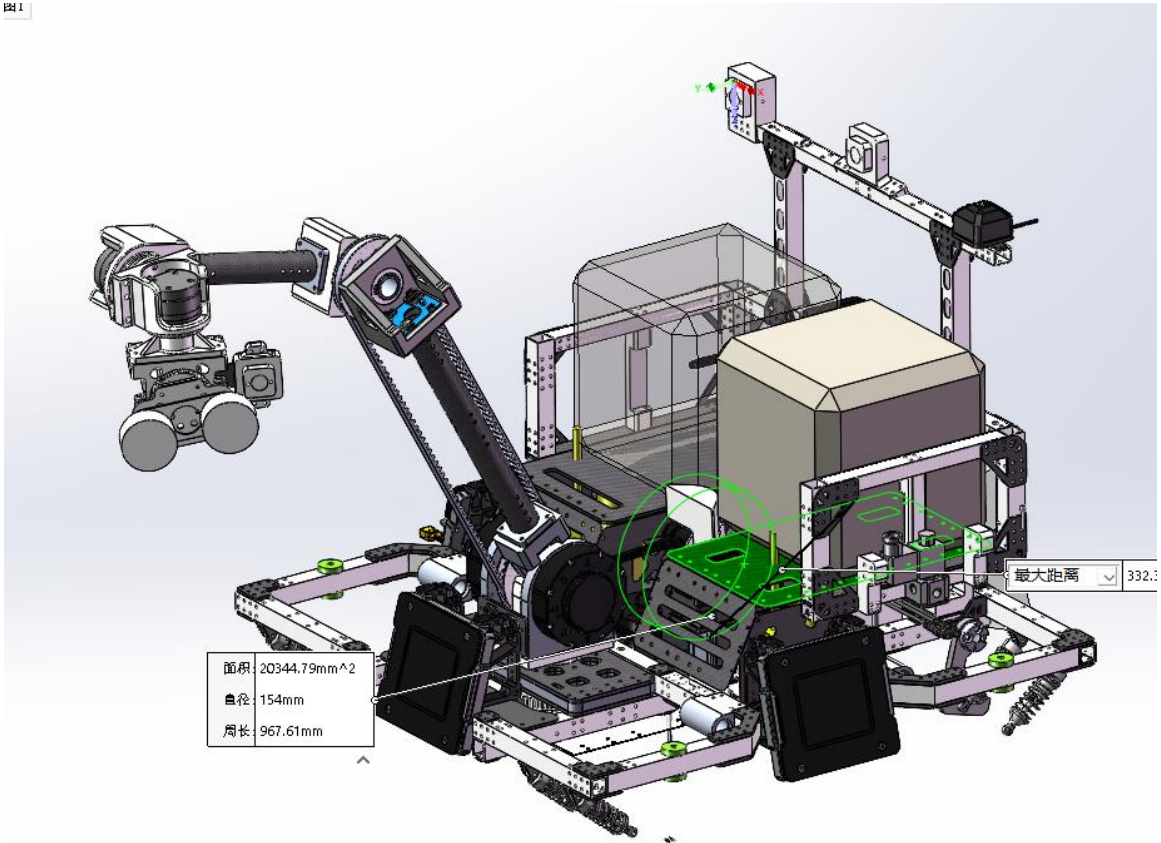


工程机器人需要频繁往返于资源岛和兑换站，底盘的运动速度也很大程度上决定了工作是否高效。而在我们的目标中，兑换每颗四级矿石用时为 30s，取、放每颗银矿石 10s，如果完成所有银矿石的兑换后，一场比赛至少已经过去了三分半钟。并且本赛季进一步缩小了盲道区域，因此工程机器人在盲道上工作的需求和对抗强度需求进一步降低。所以在底盘设计时我们优先考虑为机械臂留出足够的空间，选择了用九宫格式排布，在图示 1、3、7、9 区采用模组化的麦克纳姆轮轮系。2、5 区安装机械臂，并且降低 1、2、3、4、5、6 区上方的结构高度，为机械臂的运动留出空间。在 4、6 区摆放硬件。在 8 区放置多视角所需要的图传、小电脑以及小屏幕。

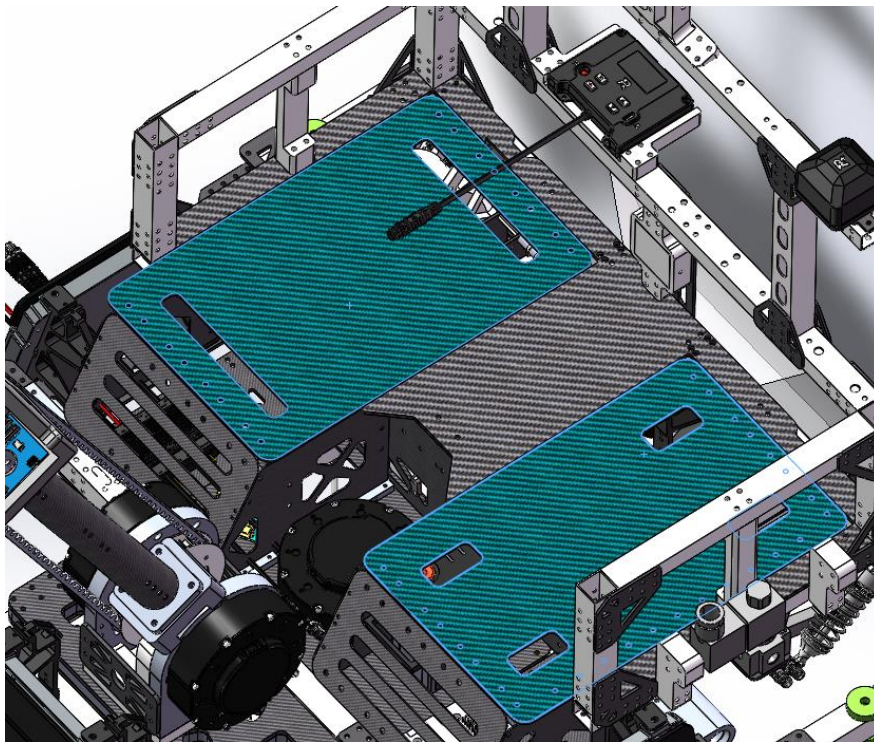


底盘框架示意

图1



上层示意图（矿仓顶部到底面距离为 332mm）



可掀式矿仓底板

矿仓的底板我们通过合页与手拧螺母固定，换电池和维护硬件时掀开。

### 1.6.1.2 前代工程重点功能设计

本代码对机械臂的控制采用了正逆运动学解算+动力学重力前馈+关节空间的角度规划的方法。

(1) 正逆运动学解算。

对于运动学的解算，采用了 modified DH 法。首先根据机械臂物理参数得出 DH Table，4 个参数表明了两个关节之间的关系。

| i | $\alpha_{i-1}$  | $a_{i-1}$ | $d_i$  | $\theta_i$ |
|---|-----------------|-----------|--------|------------|
| 1 | 0               | 0         | 0      | $\theta_1$ |
| 2 | $\frac{\pi}{2}$ | 0         | 0      | $\theta_2$ |
| 3 | 0               | $a_1$     | $+d_1$ | $\theta_3$ |
| 4 | 0               | $a_2$     | $-d_1$ | $\theta_4$ |
| 5 | $\frac{\pi}{2}$ | 0         | $d_2$  | $\theta_5$ |
| 6 | $\frac{\pi}{2}$ | 0         | $d_3$  | $\theta_6$ |



由 DH Table 可以方便得出相邻关节的齐次转换矩阵

$${}^{i+1}T = f(a, d, \alpha, \theta)$$

f 为矩阵和四个变量之间的函数关系，关于如何用 4 个变量生成齐次变换矩阵，因为存在大量资料，这里不再赘述。

我们通过 6 个关节之间的 6 个齐次变换矩阵连乘，就可以得到末端效应器相对于起点坐标系的齐次变换矩阵了

$${}^6T = \prod_{i=0}^5 {}^{i+1}T$$

可该矩阵简便表示为

$$\begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P_{1 \times 3} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$R_{3 \times 3}$  为旋转矩阵,  $P_{1 \times 3}$  为位置向量，可以通过  $P_{1 \times 3}$  直接得出当前 x, y, z 坐标。RPY 角可以利用旋转矩阵与其关系通过  $R_{3 \times 3}$  导出

$$\phi = \text{atan2}(r_{32}, r_{33})\theta = \text{atan2}(-r_{31}, \sqrt{r_{32}^2 + r_{33}^2})\psi = \text{atan2}(r_{21}, r_{11})$$

(2) 逆运动学解算

逆运动学是我们设定目标的位置和姿态反解出满足该姿态的角度。对于我们所设计的机械臂它具有 8 组解。利用目标 RPY 角和 xyz 坐标构造目标位姿齐次变换矩阵，与上文的  ${}^0T$  对应。即

$${}^0T = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P_{1 \times 3} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{又 } f(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) = g(r, p, y, x, y, z)$$

$$\text{可得 } (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) = f^{-1}(g(r, p, y, x, y, z))$$

进行相关的数学变化就可以得到 8 组解。因为推导相对复杂，这里直接给出最后的解。

$$\theta_1 = \begin{cases} \arcsin \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2}} + \arctan \frac{A}{B} \\ \left( \pi - \arcsin \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2}} \right) + \arctan \frac{A}{B} \end{cases},$$

$$\text{其中 } A = d_5 r_{23} - y, B = x - d_5 r_{13} \quad C = d_4$$

$$\theta_5 \text{ 具有两组解 } \begin{cases} \theta_5 = \arccos(-s_1 r_{13} + c_1 r_{23}) \\ \theta_5 = -\arccos(-s_1 r_{13} + c_1 r_{23}) \end{cases}$$

$$\theta_6 = \arctan \left( \frac{-s_1 r_{12} + c_1 r_{22}}{s_5}, \frac{s_1 r_{11} - c_1 r_{21}}{s_5} \right)$$

$$\text{又 } \theta_{234} = \arctan \left( \frac{r_{33}}{s_5}, \frac{c_1 r_{13} + s_1 r_{23}}{s_5} \right)$$

$$\theta_{23} = \arctan \left( \frac{B - a_2 s_2}{a_3}, \frac{A - a_2 c_2}{a_3} \right)$$

$$\theta_2 = \begin{cases} \arcsin \left( \frac{F}{\sqrt{M^2 + N^2}} \right) - \arctan(M, N), \\ \left( \pi - \arcsin \left( \frac{F}{\sqrt{M^2 + N^2}} \right) \right) - \arctan(M, N), \end{cases}$$

$$\text{其中 } F = A^2 + B^2 + a_2^2 + a_3^2, M = 2Aa_2, N = 2Ba_2$$

$$A = c_1 x + s_1 y - d_5 s_{234} - d_6 c_{234} s_5, B = A = z + d_5 c_{234} - d_6 s_{234} s_5$$

$$\theta_3 = \theta_{23} - \theta_2$$

$$\theta_4 = \theta_{234} - \theta_{23}$$

因为涉及 8 组解，即使考虑机械限位导致某些解物理上不可达的情况下，仍存在多组解，所以对解进行选取。这里使用计算 6 个关节的转动角度的加权平方和，选取值最小的解，作为使用的解。

(3) 动力学重力前馈

机械臂在运动过程中主要会受到重力矩，离心力等力的影响。其中重力矩是占主要部分因此引入重力补偿对其具有重要的意义。

结合理论力学，我们可以得出机械臂的拉格朗日方程

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} + \frac{\partial U}{\partial q} = \tau$$

其中第三项即为重力矩。其中

$$U = mgh$$

带入可得

$$\frac{\partial U}{\partial q} = \frac{\partial mgh}{\partial q} = mg \frac{\partial h}{\partial q}$$

m 为各关节质心中点位置向量,  $\frac{\partial h}{\partial q}$  可以通过各个关节重心的雅各比矩阵导出。有如下公式:

$$G1 = -m1gl1\cos\theta1 - m2g(l1\cos\theta1 + l2\cos(\theta1 + \theta2)) - m3g(l1\cos\theta1 + l2\cos(\theta1 + \theta2) + l3\cos(\theta1 + \theta2 + \theta3))$$

$$G2 = -m2gl2\cos(\theta1 + \theta2) - m3g(l2\cos(\theta1 + \theta2) + l3\cos(\theta1 + \theta2 + \theta3))$$

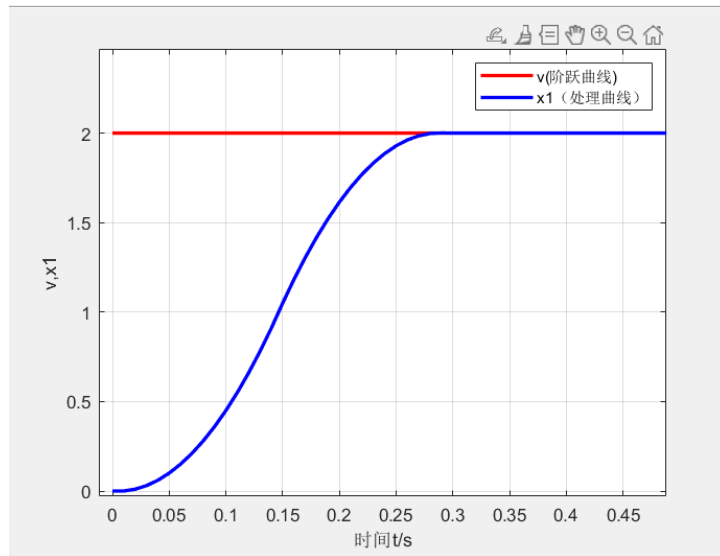
$$G3 = -m3gl3\cos(\theta1 + \theta2 + \theta3)$$

实际测试具有一定的效果，在引入力矩前馈后目标角度和反馈角度的误差被控制在 0.5° 左右。如图，红线为力矩预测值，绿线为电机反馈力矩。

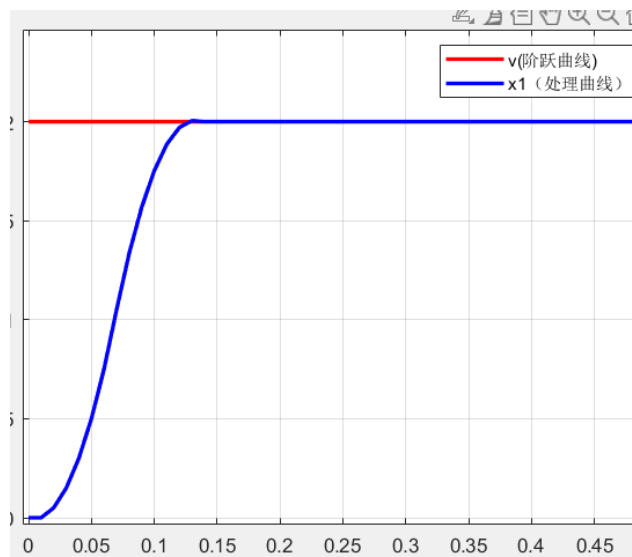


(4) 关节空间的角度规划的方法

对关节空间进行规划，并没有采用常见的 3 次或者 5 次多项式插值的办法，而是采取了 ADRC 中的跟踪微分器来对阶跃曲线平滑化。原因在于，可以通过调节跟踪微分器系数，来调节跟踪速度，从而使得各个关节能较为紧密且平滑地跟随响应曲线。下图为 MATLAB 仿真图像。



跟踪系数  $R_0$  较小时



跟踪系数  $R_0$  较大时

## 1.6.2 测试记录

### 1.6.2.1 涵道反导 (6.30-7.4)


测试对象为自家飞镖，重量和尾翼大小在各高校队伍内均为偏大。使用 70mm 和 90mm 涵道测试，测试时供电使用 6s 航模电池，涵道离地面高度为 950mm。

通过观察稳定击中的飞镖在有/无涵道作用时的散布区域。此测试仅作可行性验证。




**大推力70涵道大暴风DoBoFo保修 [交易快照]**

颜色分类: 套餐五(6S涵道+80A电调) 飞机种类: 70涵道12叶 CCW逆时针?


 保障卡

发货时间: 06月01日 00:50前发货



**群汐90MM12叶EDF航模涵道风扇筒 [交易快照]**

颜色分类: QF3748-1450KV (6S) 飞机种类: 90mm涵道

 保障卡

发货时间: 09月04日 16:53前发货



图 1.6.1-1~3 涵道型号及测试环境

#### 单个 70mm 涵道（在 1600W 下）

对于即将击中前哨站的飞镖：姿态改变明显，飞镖头向下改变 10 度以上，轨迹改变基本没有，落点偏差小于半块小装甲板，无法达到反导需求。

对于刚出射飞镖（即涵道在飞镖架前 1m）：飞镖轨迹与姿态改变明显，最终落点偏差远大于一块小装甲板，能达到反导需求

#### 单个 90mm 涵道（在 3000W 下）

对于即将击中前哨站的飞镖：姿态改变明显，落点改变约为半块小装甲板，从概率上来讲仍然无法达到反导需求。

**70mm 涵道与 90mm 涵道组合**（两者功率分别为 1600W 和 3000W，涵道和顶部装甲板三点一线）

对于即将击中前哨站的飞镖：姿态改变明显，落点改变略大于半块小装甲板。但是未能达到一块装甲板大小，反导功能不稳定。

### 小弹丸

距离 10cm 左右时，涵道对于 16m/s 小弹丸弹道轨迹无明显作用。舍弃。

小弹丸击打 1m 高自由落体飞镖无明显作用，泼水式发射干扰飞行飞镖极难命中。舍弃。

### 供电（理论上，未来得及测试）

因规则对电池限制为干电池以及大疆官方锂电池，此外，官方对能量限制 300，所以 tb47 只能用 3 块，理论上只能供 1500w。（tb47 是 5c 的供电能力，理论供电能力  $99wh/24V * 5 * 24V = 495$ ，实测超过 500w 就容易烧穿里面的电路，无人机上的电池有穿过）而 fpv 电池是 10c，是大疆放电倍率最高的电池。并联起来理论供电能力就高一倍，3000w。

最终由于实现难度以及开销，确定方案为一个 90mm 涵道，车上带 3 块 tb47 电池并联，最高 1500W，在己方半场开启作用为干扰对方飞镖调试，如果能够抵达对方飞镖架前方则能产生决定性影响。

## 1.6.2.2 视觉测试（7.8-7.9，开展对象为分区赛工程，视觉兑换四级矿石）

测试结果：使用视觉兑矿后，平均 6 秒进行视觉识别，4 秒进行微调并兑矿，平均可以在 10 秒左右完成兑矿。

测试细节：

- 1、在 pitch 角为 10° 时进行了 roll 角 0°、30°、45°、-45° 的测试，均能在 10 秒左右完成兑矿。操作手只需在 z 轴上进行 1cm 左右的调整即可。
- 2、在 pitch 角为 45° 时分别对高位矿仓和低位矿仓进行了 roll 角 45° 和 -45° 的测试，该角度下视觉识别精准，基本不需要微调，但是在吸盘带动矿石抬起时会击打到兑换框造成框的微小位移，不过基本不影响兑矿。

兑矿耗时记录表

| Pitch 角 | 0°  | 30° | 45° | -45° |
|---------|-----|-----|-----|------|
| Roll    |     |     |     |      |
| 10°     | 11s | 13s | 12s | 11s  |
| 低位 45°  | /   | /   | 9s  | 8s   |
| 高位 45°  | /   | /   | 11s | 8s   |



### 1.6.3 版本迭代过程记录

| 版本号或阶段 | 功能或性能详细说明  | 完成时间       |
|--------|--|------------|
| V1.0   | 测试版本六轴机械臂。大臂双端支撑，各部零件使用打印件制作，强度不足时使用玻纤板夹打印件设计。理论上能达到四级兑矿。  | 2022.10.24 |
| V1.1   | 测试版本六轴机械臂。大臂单端支撑，各部零件使用打印件制作。为减小机械臂力矩，电机整体下移，使用同步带驱动。实现运动学正逆解算和动力学补偿，关于关节空间的规划，开发第一视角和第三视角两种模式，理论上能达到四级兑矿。 | 2022.11.18 |
| V2.0   | 搭载六轴吸盘机械臂的工程机器人。除了通过机械臂取、兑矿石外，能够实现底盘运动、钩车救援、矿仓存矿、多视角运行，能够实现四级兑矿。优化了机械臂各零件的安装孔位以及电、气走线。                     | 2023.3.5   |
| V3.0   | 完成了对 3r 机械臂以及横移机构的设计，并使用打印件代替加工件验证了锥齿轮功能。  | 2023.6.6   |
| V4.0   | 完成整车装配，添加了广角工业相机以供视觉识别。  | 2023.7.26  |
| V4.1   | 整车基本功能实现。能够正常运动以及单独控制单个关节以实现基本功能。添加了 UWB 定位模块的安装。  | 2023.7.29  |
| V4.2   | 在升降两侧各增加一条加固导轨，解决了升降滑齿的问题。能够实现一键取矿、空接、地矿功能。  | 2023.7.31  |
| V4.3   | 补充了涵道反导机构的结构设计（未落地），对机械臂的线路进行了重新排布，补充了视觉重启、死亡上电后手动初始化的功能。  | 2023.8.9   |

### 1.6.4 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 | 解决人员                       |
|----|----------------------------------|---------------------------|---------------------|-----------|----------------------------|
| 1  | 机械臂在运动到较低姿态时大臂电机发热严重，工作时间在 20 分钟 | 单端支撑导致的零件变形，大臂电机工作到较低角度时产 | 使用板材夹打印件替代原有一体的打印件。 | V1.1      | 机械工程师：欧阳时进、李焱<br>算法工程师：王宏杰 |

| 序号 | 问题描述   | 问题产生原因                            | 问题解决方案<br>&实际解决效果                       | 机器人版本号或阶段 | 解决人员                               |
|----|--|-----------------------------------|---|-----------|------------------------------------|
|    | 左右便会过热断电。  | 生干涉。                              | 电机带载运行三十分钟后发热显著降低，未出现断电保护。              |           |                                    |
| 2  | 金矿识别飘忽不定，与金矿的距离发生变化、金矿倾角过大时极大概率出现检测失效。                     | 传统视觉利用面积与比例筛选具有一定限制。              | 调整面积阈值。<br>最终识别率大大提高。                   | V1.1      | 算法工程师：陈识曲、钟万淇、杨晟琪                  |
| 3  | 机械臂与真空泵使用同一块电池同时供电时，机械臂偶尔断电重启。                             | 真空泵与机械臂共用一块电池引起电流不稳               | 使用双电池供电方案                               | V2.0      | 机械工程师：李垚<br>硬件工程师：吕家昊、王宏杰          |
| 4  | 升降机构运动到较低处时会跳齿，此时齿轮和齿条肉眼可见间隙较大。用手同时向内挤压底盘升降和上层升降时底盘升降形变明显。 | 装配误差导致底盘升降宽度略窄于上层机构，运动到低处时挤压导致滑齿。 | 在两侧升降处各增加一条导轨，保证整体刚度。<br>间隙恢复正常，未再出现跳齿。 | V4.2      | 机械工程师：方振东、欧阳时进                     |
| 5  | 机械臂 pitch 向下反转到 180 度同时转动 yaw 轴会拉扯线材，导致电机掉线。               | 线材拉扯磨损                            | 重新走上层线横移电机不从机械臂分电板取出。<br>未再离线。          | V4.3      | 机械工程师：曾泽康、方振东<br>硬件工程师：胡葛恩、王宏杰、吕家昊 |
| 6  | 兑换框识别位姿准确，但机械臂运动姿态与需求相反。                                   | 解算有问题                             | 识别兑换框时 Yaw 轴只能在初始角度能够准确识别以及运动到对应位置      | V4.3      | 嵌入式工程师：王宏杰                         |

## 1.7 技术方案复盘

回顾本赛季技术方案，结合赛场实际的发挥表现，分析评估本赛季技术方案是否达到预期的效果。

### 1.7.1 赛场性能表现情况分析

客观复盘赛场实际的发挥表现。可以从机器人功能定义、机器人核心参数出发，分析技术方案的落地情况。

工程机器人在场上的主要工作是获取经济，经济自然会转化为队伍的优势从而赢下比赛。以下将经济获取拆成以下几个部分：取矿、兑换、调整、地矿、空接。数据取自上场的全部 4 场比赛。

| 对局                  | 取矿用时 (秒) | 兑换用时 (秒) | 备注    |
|---------------------|----------|----------|-------|
| vs 太科 game1         | 62       |          | 银矿    |
| 初始化出问题<br>导致取矿多次失败  | 43       |          | 银矿    |
| 视觉离线                | 14       |          | 银矿    |
| vs 太科 game2         | 13       |          | 银矿    |
| 视觉离线                | 19       |          | 银矿    |
|                     | 10       |          | 银矿    |
|                     | 12       |          | 不规则金矿 |
| vs 深大 game1         | 57       |          | 银矿    |
| 初始化出问题<br>导致取矿多次出问题 | 35       |          | 银矿    |
| 视觉离线                | 16       |          | 规则金矿  |
| vs 深大 game2         | 15       |          | 银矿    |
| 视觉离线                | 10       |          | 银矿    |
|                     | 8        |          | 银矿    |
|                     | 21       |          | 规则金矿  |

其中地矿的使用主要集中在兑换站前碰掉矿石以及在盲道颠掉矿石，空接为求保底经济获取以及仅在与深大的第二场使用。空接与地矿功能实现而且一键正常。

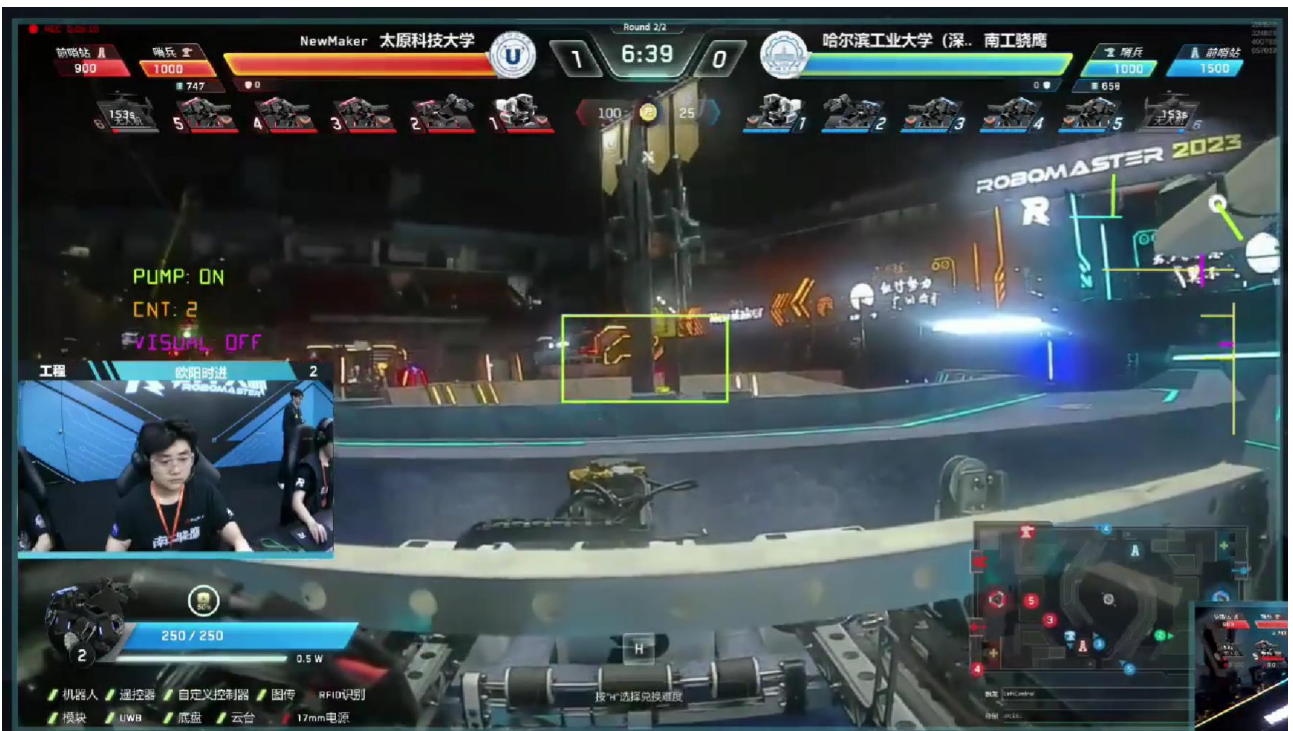


图 1.9.1-1 取银矿视角

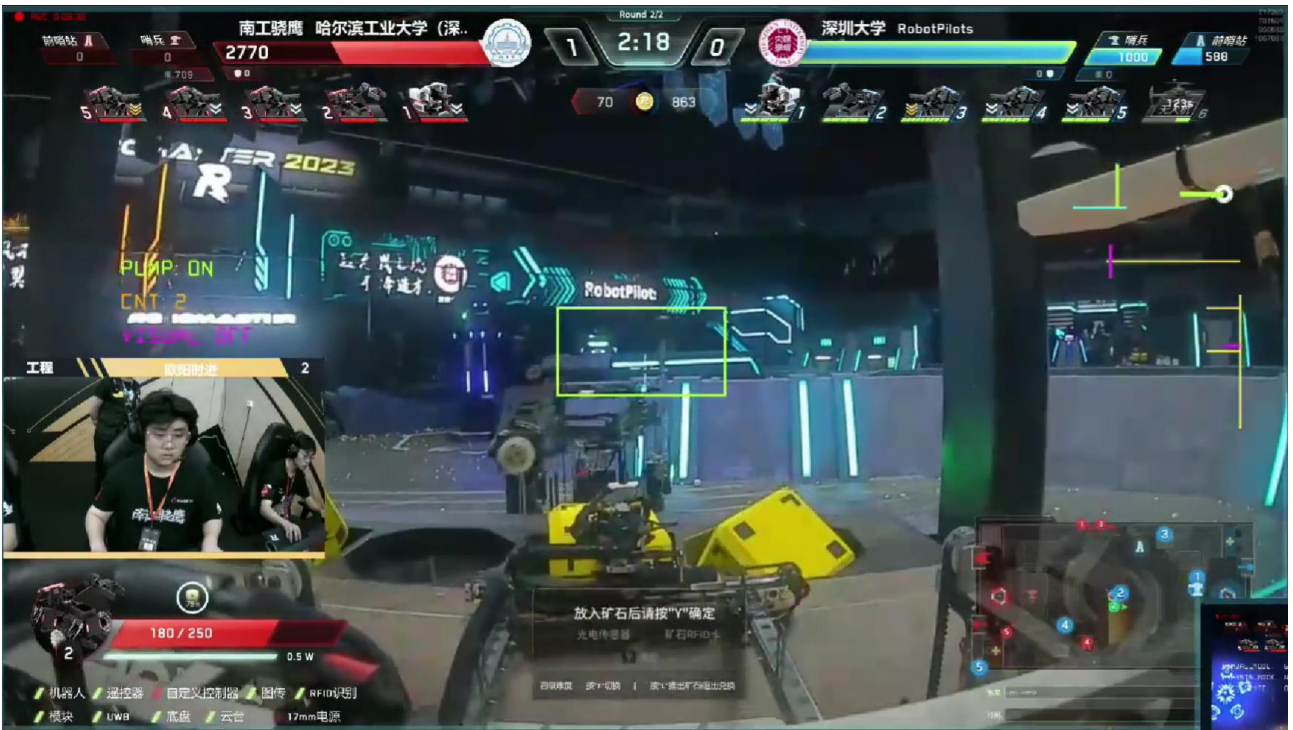


图 1.9.1-2 取大资源岛金矿视角

金矿识别离线，仅成功使用视觉兑换一颗矿石。

## 1.7.2 赛场性能表现与规划对比分析

根据技术方案的落地情况，分析与规划的差距情况和原因。

未出故障情况下一键取矿平均用时 12.5 秒，但上场的四场中两场都出现了初始化高度有误的问题，后检查为代码 bug，最终取矿平均用时 23.9 秒/矿。

在兑换上每个五级矿石平均用时 33 秒，但是兑换失误如矿石因碰撞掉落是造成时间损失最大的问题。

设计的矿仓未能派上用场，仅使用转矿机构。

取矿时吸到矿石倒角时应该松开重新吸取，因为在兑换时容易碰撞掉落。

兑换时不熟悉视野，挺多时候需要在较低视角兑换更佳。

稳定性上，初始化问题的 bug 未能早发现。

规划上的自定义控制器未能落地。

以上原因主要有两个：进度迟了、功能优先级不合理。

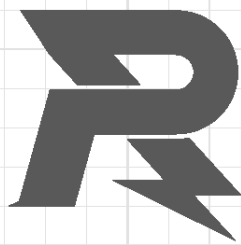
期间很多的稳定性问题都未能得到妥善解决，例如重走了 N 遍的横移线，视觉离线等。在上场前仍然在解决稳定性问题，操作手没有足够时间训练与发现问题。

优先级上，在最后视觉与自定义控制器不能兼得的情况下选择了视觉，但是未能解决视觉掉线问题，在解算上花费的数个晚上精力也未能得到体现，最后只能依靠一键与操作手微调。由于不合理的战术目标制定，前期涵道测试与车体功能取舍花费了太多精力与时间。场上表现也是如此，特别是在第一日与上海交通大学的比赛中，应当以兑换矿石作为第一优先级，而非作用不大的阻挡。

### 1.7.3 经验总结

*结合参赛队实际资源投入和技术现状，总结沉淀切实可行的机器人设计经验。*

- 1.不能什么都要，优先级分清。从战术目标明确项目需求，矿仓可以说没必要，只需要转矿机构。
- 2.车能用，人不行，白搭。训练时间不够，遇见的问题比如吸盘碰到兑换框容易掉问题未能发现，初始化不对会寄等等问题。分区赛工程做到的是自动化流程与人工使用结合很好的例子。
- 3.问题要尽快解决。小臂掉线问题一直给调试让路，直到最后才解决。
- 4.三人合作画车的安排。先确定主要执行机构划分，如升降、推出、横移、机械臂、底盘、转矿等。在设计初期确定各执行机构主要结构与尺寸，以及相互之间的连接方式与零件命名，再分配给各个部分负责人分别同时推进。并且每日相互更新图纸。最终效果是一人负责转矿、硬件排布，一人负责升降、推出，一人负责底盘、机械臂、横移。
- 5.进度是一切功能实现的根本。
- 6.当压力变大/人力有穷/内耗过大时，团队里需要有一人承担队友的情绪价值。RM 比赛对于个人功利角度可能收益较低，而且由此耽误其他方面的结果和面前的压力很容易让人产生内耗，不是所有人都能很顺利度过这一关，最好是整个项目的负责人一直能够关心每个人在做什么，提供情绪价值，帮助做出决定说什么要什么舍弃。



邮箱: [robomaster@dji.com](mailto: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