

Using a 32-bit vector driver chip and Field-Orientation Control (FOC), the RoboMaster C30 Brushless DC Motor Speed Controller enables precise control over motor torque.



机甲大师
ROBOMASTER

Ergonomically designed for the RoboMaster M300 PB Brushless DC Motor Module and C300 Brushless DC Motor Speed Controller, this M300 Accessories Kit includes several tools and a terminal board.

Referees System Specification Manual, Referees System User Manual, Instructions of Referees System Module

4x M300 Accessories Kit include several tools and a terminal board, covering complete preparation system driven by four independent motors.

ROBOMASTER

机甲大师超级对抗赛

技术方案

华中科技大学 狼牙 编制

2023年8月发布

前言

本文档由华中科技大学狼牙战队编制，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	刘旭东	王超
硬件	李宜桐	丁硕
软件	吴垂云	王世康
算法	卢诗齐	柳清星
其他	吴培诚	段康晟

目录

前言.....	2
1. 概述.....	4
1.1 背景与目标	4
1.2 其它学校机器人分析综述	5
1.2.1 其它学校机器人优缺点对比	6
1.2.2 总结.....	7
1.3 机器人功能定义.....	8
1.4 机器人核心参数.....	10
1.5 设计方案.....	11
1.5.1 机械结构设计	11
1.5.2 硬件设计	19
1.5.3 软件设计	27
1.5.4 算法设计	33
1.5.5 其它.....	51
1.6 研发迭代过程	59
1.6.1 研发迭代记录	59
1.6.2 测试记录	61
1.6.3 版本迭代过程记录	62
1.6.4 重点问题解决记录.....	62
1.7 团队成员贡献	63
1.8 参考文献.....	64
1.9 技术方案复盘	64
1.9.1 赛场性能表现情况分析.....	64
1.9.2 赛场性能表现与规划对比分析.....	65
1.9.3 经验总结	65

1. 概述

1.1 背景与目标

工程机器人是 Robomaster 赛场上极其重要的一部分，其工作效率及其稳定性直接决定着队伍的发挥水平，工程机器人有三大核心任务：**取矿、兑换、救援**，其中取矿和兑换尤为重要。如果工程机器人不能高效率地获取并成功的兑换矿石，队伍几乎没有获胜的可能。相比于 RMUC2022 的比赛规则，23 赛季的新规则对于工程机器人的设计提出了更高的要求，特别是新赛季经济体系和复活机制的更新，高效的获取矿石并将其及时转换为队伍经济，可以为队伍建立高火力、快节奏的进攻优势，充足的经济积累已成为队伍一路顺风或者逆风翻盘的决定性因素。

考虑到工程机器人需要在有限的尺寸下实现非常多的功能，最难的功能莫过于适应各个兑换难度下姿态各异的兑换站，考虑到多个机构之间的**相互干涉和尺寸限制**，我们决定用一个灵活的机构实现大部分功能。由于新规则兑换机制中兑换框姿态变化涉及的自由度很多，传统的工程机器人结构难以适应难度较高的兑换姿态，而且考虑到手动兑换的失误多、效率低下，我们决定设计以**机械臂为主体结构**的工程机器人，并以**合理的视觉方案和自主设计的控制器**实现精准高效的矿石兑换。

工程机器人在 2023 赛季与 2022 赛季相比主要有以下几点改变：

- (1) 取消刷卡原地复活其他机器人的功能；
- (2) 金矿掉落顺序改变，新增首金奖励机制，部分金矿掉落后状态随机；
- (3) 银矿石数量增加至 5 个；
- (4) 大小资源岛高度一致，统一为 500mm；
- (5) 兑换获得金币值与兑换难度相关，同等难度下金银矿石兑换金币值差别很小，随着队伍累计经济总量增加，兑换难度增大。

对于取矿方面，工程需要取到五种状态下的矿石，分别是：1)大资源岛平台上掉落规则的矿石，2)大资源岛平台上掉落不规则的金矿石，3)空中正在掉落的金矿石，4)落在地面上的矿石，5)小资源岛平台上的银矿石。从大资源岛的平台取矿历来是使用次数最多的取矿方案，但今年**金矿石的不规则掉落、银矿石数量的增加以及同等兑换难度下与金矿石兑换金币差值的减小使得拿取银矿石成为本赛季取矿首选**。在 2022 赛季空接成为绝大多数学校的标准配置，空接高度也越来越高，虽说今年大资源岛取矿的优先度有所降低，但首金奖励机制的新增使得空接功能的竞争依然很激烈，在这样的环境下，工程的 1000mm 极限高度的取矿成为工程的刚性需求。考虑到空接的失误率以及双方争抢过程中矿石掉落到地面上的情况，我们需要使工程机器人能够取到地面的矿石来应对矿石落地带来的经济损失。

a) 兑换

新赛季的兑换规则可描述为：操作手兑换时手动选择兑换难度，在一个限定的球面范围内，每次矿石兑换时，兑换槽的六个自由度（三个平动自由度和三个转动自由度）会根据兑换难度随机变动，而且随着队伍累计兑换金币值的增加，发生变化的自由度也会增加，兑换难度随之加大。兑换槽的三个转动自由度以及兑换时底盘断电机制的增加，使得工程机器人在保持基本外形尺寸和合理的伸展尺寸外至少要保证执行机构末端有三个自由度。工程机器人将矿石二维码一面朝下放置于兑换槽内经过扫描识别后兑换成功。由于矿石掉落以及收集具有较大不确定性，如果没有调整矿石姿态的机构，矿石的姿态大概率不适合去兑换，这对兑换造成极大的不便利，对经济方面也有较大损失。理论上来说，使矿石发生两个正交方向上的转动就可以使任意姿态下的矿石变成适合兑换的姿态，工程机器人末端三自由度之一的 Roll 轴转动可以使矿石发生一个方向上的旋转，只需在矿仓或其他地方增加一个使矿石发生单向转动的机构即可使矿石调整到合适姿态。

b) 复活

今年取消了工程机器人刷救援卡原地复活其他机器人的功能，改为阵亡机器人可原地读条复活或兑换金币复活，但由于刚读条复活的机器人血量薄弱且需要回补血点重新解锁发射机构，可以考虑在其阵亡后由工程机器人将其拖回补血点，这样可以加快复活读条，提供一个安全的复活环境，同时方便复活后快速回复血量和解锁发射机构。对于救援爪的救援功能需要保证救援爪能稳定抓住阵亡的机器人并且将其拽至复活处，由于大资源岛附近盲道的存在，在路段上行驶需要爪子更大的稳定性，不能出现路上脱钩的情况。

c) 障碍块获取

工程机器人需要能够稳定自如地搬运障碍块，并且将其放置于关键的战略点，例如飞坡点阻碍对手飞坡，或者稳定地挡住工程的前装甲板，使工程机器人成为优秀战略盾牌角色。上述功能在突进或者防守方面具有极大的战略意义。对于今年前哨站的底部旋转，工程机器人亦可以将障碍块搬运至前哨战前方，一定程度地抵挡敌方子弹的威胁。

1.2 其它学校机器人分析综述

在 2023 赛季，新规则对工程机器人的改动非常大，特别是新的经济体系和矿石兑换机制。这导致之前赛季的工程机器人设计在本赛季的参考价值有限。然而，某些子模块仍具有一定的借鉴意义。在 2022 赛季中，工程机器人功能设计的优先级通常为“取矿兑换 > 救援 > 障碍块 > 其他”，部分学校也非常重视获取地面矿石的能力。

“取矿兑换”是最重要的功能，因为强大的取矿能力可以直接转化为显著的经济优势。从分区赛各队伍的表现来看，取矿兑换的方式主要有吸盘和夹爪两种。两者各具特点，搭配适当的传感器，可以实现出色的空接功能。下面，我们将分析 2022 赛季一些特色鲜明的工程机器人。

(1) 吸盘式取矿兑换机器人：

吸盘式工程机器人利用真空吸盘来抓取和释放矿石。这种方式具有操作简单、抓取稳定的优点。适当配置吸盘和真空泵，可以确保在各种条件下快速、稳定地抓取矿石。配合精确的传感器，如激光雷达或视觉系统，机器人可以实现准确的空接和定位功能。

(2) 夹爪式取矿兑换机器人：

夹爪式工程机器人采用夹爪来抓取和释放矿石。这种方式在抓取力度上具有更好的控制，能够适应不同形状和大小的矿石。夹爪可以采用多指设计，以增加稳定性和适应性。通过搭配合适的传感器，如摄像头或超声波传感器，夹爪式工程机器人可以完成精确的空接和定位任务。

在 2022 赛季中，各个队伍的工程机器人设计各具特色。有些团队优先考虑取矿能力，部署强大的取矿和兑换系统；而有些团队则注重多功能性，使机器人能够在救援、清障等方面发挥作用。以下是对具体学校具体分析的表格汇总。

1.2.1 其它学校机器人优缺点对比

表 1.2.1-1 其它学校机器人优缺点对比

学校	值得借鉴之处	有待改进之处
南京理工大学 2022 赛季 工程	采用吸盘结构吸取矿石，在空接高度方面胜过一切夹爪车。其强力的空接能力极大地弱化了吸盘车在抢夺 地面矿石或非正常姿态的岛上矿石不占优势的影响。	但他们的机器人取矿稳定性不够，比赛现场表现欠佳。 其吸盘结构在取矿时对于矿石姿态要求过高，吸取非正常形态的矿石有一定的困难。
	整车初始状态重心低，行进过程平稳。 前后延伸机构采用铝管配合自制轴承盒结构，轻量化而实现高效，反应速度快。	
太原理工大学 2022 赛季 工程	太原理工大学的工程机器人创新性的使用了线连杆方案，搭配夹爪机构，一定程度上克服了夹爪机构尺寸受限的缺点	从分区赛表现来看，他们的机器人表现中规中矩，稳定性不高。

	由于夹爪机构在空接状态下的劣式，他们采用了反空接的设计，通过摩擦轮旋转来干扰对方队伍的空接同时可以将矿石送回己方区域，通过捡拾地面矿石的方式建立经济优势	
西安交通大学 2022 赛季 工程	西安交通大学的取矿机构采用吸盘方案，吸盘系统包括气路设计非常科学	由于他们的工程车进行了创新性的设计，但是没有完善的改进，所以整体竞争性不强。
	他们力求以最简单的结构实现尽可能多的功能，通过严密的理论推导得出了相关设计参数	

1.2.2 总结

根据现场各个队伍工程机器人的表现可以看出，采用吸盘结构吸取矿石的工程机器人在空接高度方面表现出色，性能均优于夹爪式工程机器人。这种设计具有极大的空接能力，可以大大弱化吸盘式工程在抢夺地面矿石或非正常姿态的资源岛上矿石不占优势的缺点。但是，从重心设计来看，吸盘式设计需要整车初始状态下重心尽可能低且靠近中心，以保证机器人移动的迅速和通过起伏路段的平稳。这对整车的设计和结构强度提出了很高的要求。特别是前移、横移机构的结构强度必须要足够强，否则在空接、取矿的过程中，整体结构变形较大，末端执行机构的实际空间位置与理论不符，将导致取矿、兑换的失败。

从视野范围来看，图传尽量与左右平移一体，在运动时同步运作，保证视角在移动时始终正式前方，给予操作手更好的对位操作体验。这可以增强操作手的对位能力，提高机器人的操作精度和效率。

综上所述，设计一个具有高空接能力、低重心、强结构强度和良好视野范围的工程机器人，是在比赛中取得成功的关键因素之一。

1.3 机器人功能定义

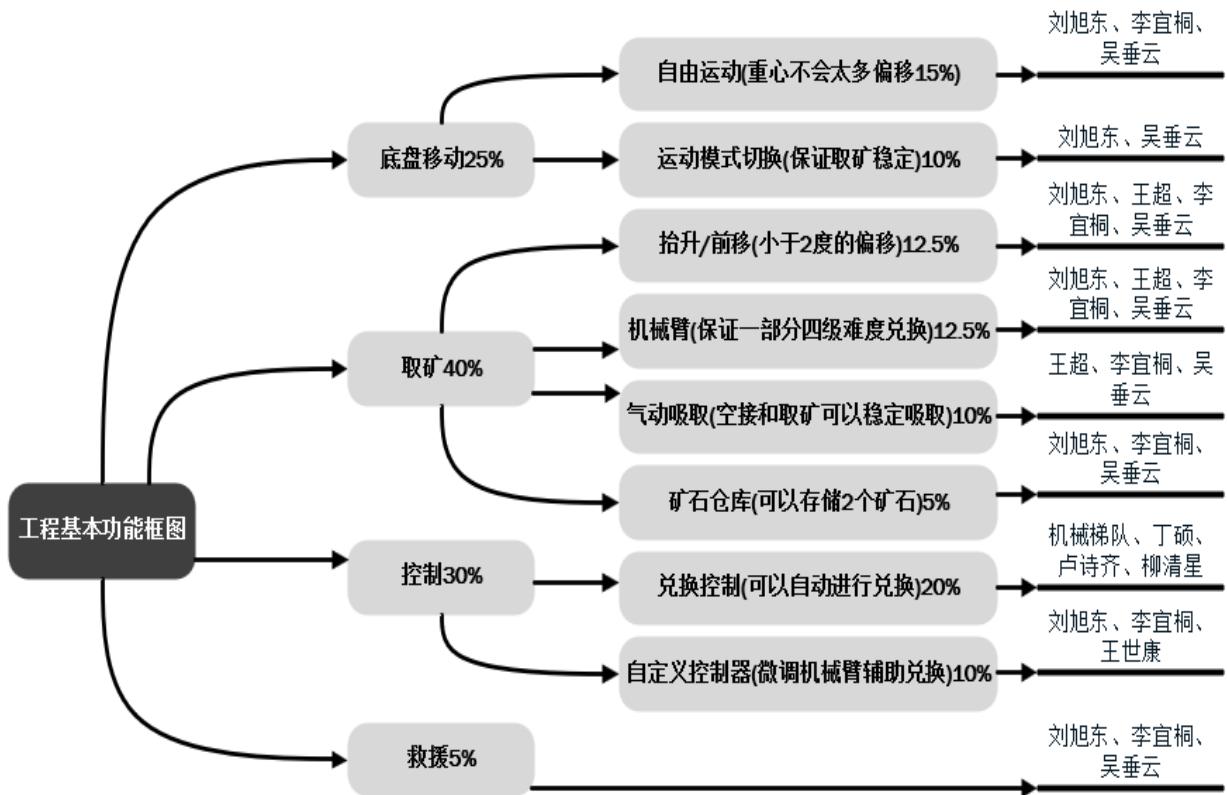


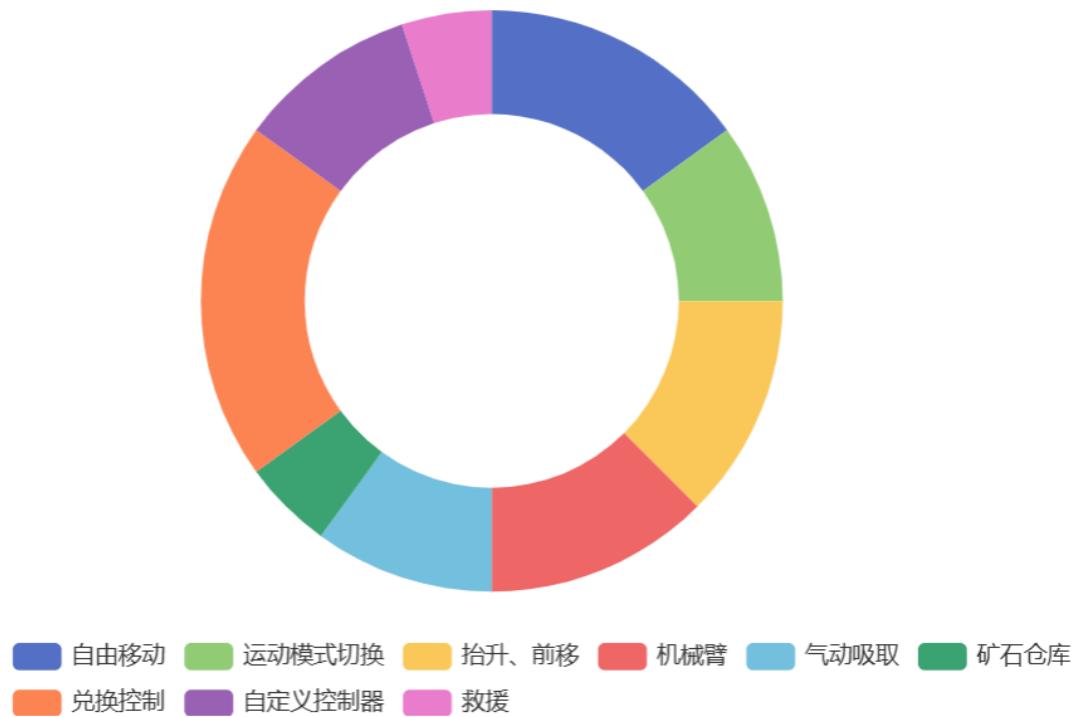
图 1.3-1 工程基本功能框图

工程机器人的功能定义主要分为四个方面，包括**底盘移动**、**取矿**、**控制逻辑**和**救援**。我们在图中标注了相应部分的权重，权重越高表示该功能越重要。从图中可以看出，**取矿**和**控制逻辑**是最重要的部分，分别占到了 30% 和 40% 的权重。

底盘移动进一步细分为自由运动和运动模式切换两部分。它们的主要目的是确保整个工程车的重心保持稳定，防止翻车的情况发生。同时，底盘采用两套 PID 来适应正常运动和取矿对准时的微调。

取矿模块包括前移/抬升、机械臂、气动吸取和矿石仓库四个部分。抬升和前移的设计保证偏移小于 2 度，确保取矿和兑换的稳定性。机械臂则根据今年的新规则进行调整，以适应高难度的兑换任务。气动吸取系统主要用于空接和抢夺金矿时，能更有效地吸取矿石。矿石仓库则可容纳两个矿石，加上吸盘上一直吸取的 1 个矿石，工程车一次可以携带 3 个矿石，更符合比赛节奏。

控制方面主要分为兑换控制和自定义控制器。兑换控制由视觉坐标回传和运动学逆解组成，实现自动识别兑换站位置并进行兑换。自定义控制器则主要辅助操作员进行辅助兑换。此外，在相应功能的介绍中，我们还附加了负责各个功能的团队成员的名字。



1.4 机器人核心参数

参数	描述
重量	32.1kg(含裁判系统)
尺寸 (长宽高)	590*590*580(收缩尺寸)920*995*995(伸展尺寸)
最大工作电压	24V
电机数目与用途	DJI M3508 电机*4(底盘移动) DJI3508 电机*2(链条抬升) DJI3508 电机*2(导轨前移) DJI3508 电机*2(大 Pitch 轴旋转) DJI3508 电机*1(横移) DJI3508 电机*2(机械臂 Yaw 轴、Pitch 轴) DJI2006 电机(Roll 轴旋转) MG995 舵机*2(图传云台) SC32-40 气缸*2(底盘支撑) SMCDJ2B-10 气缸*2(救援爪)
车体最大移动速度	5.12m/s
爬坡角度	41°
主要传感器型号、参数、数量	恒工业相机 MER2-160-227U3M*1 松下激光测距传感器 HG-C1030*2
云台自由度:	Yaw: -90° ~ +90° Pitch: -45° ~ +45°

1.5 设计方案

1.5.1 机械结构设计

机械整体设计主要将工程机器人分为**机械臂**和**底盘**两部分。

1.5.1.1 机械臂

如图 1.5.1.1-1 所展示，机械臂基本自由度由 4 个转动副和 3 个移动副组成。

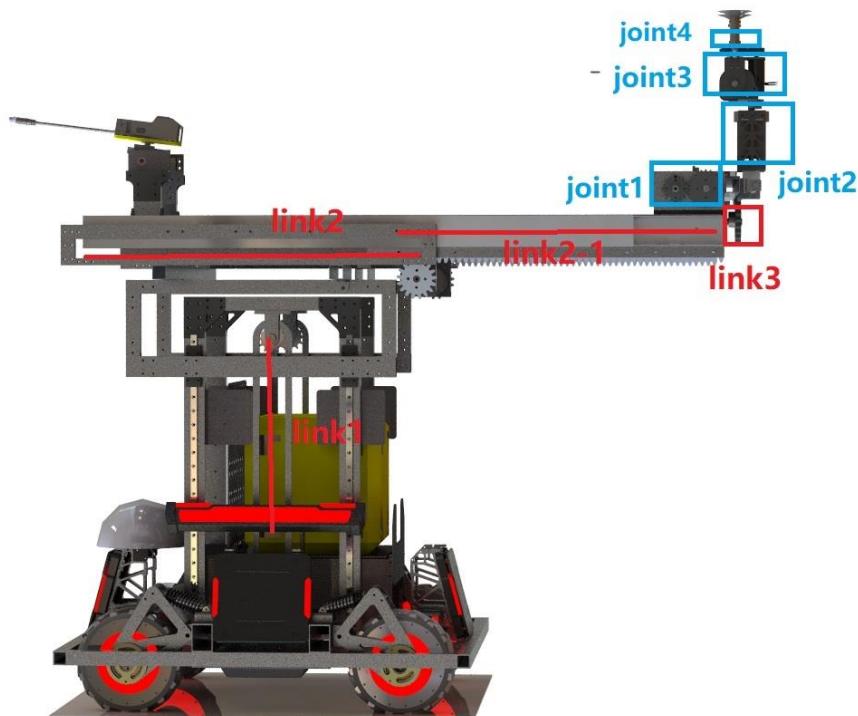


图 1.5.1.1-1 机械臂结构示意图

机械臂每个自由度由各电机独立驱动，机械分别采用了链传动，齿轮齿条传动，改电机减速比后直连等方式。

Link1:

主要采用链条抬升，由于其具有传动具有高效、精度高、负载能力强、耐磨性好、可靠性高和维护方便等优点，且一般工程的抬升往往需要很大的重量。电机选型采用 DJI M3508，另外外加两个 6kg 恒力弹簧，由此来抵消机械臂的整体重量，使得在无外力作用下，前移不会有很多的偏移。为配合两侧装甲板高度并满足规则限高，我们将升降架放置在距离中心 225mm，依然满足矿仓存储矿石的要求。升降支架主体采用两根 20*30 的铝管支撑，壁厚选择 2.5mm，在保证强度的情况下尽量减少质量。



图 1.5.1.1-2 机械臂 link1 示意图

Link2:

Link2 采用的齿轮齿条的传动方式，驱动为两个 DJI M3508 电机。齿轮齿条传动具有传动效率高、传动精度高、负载能力强、耐磨性好、等优点，但也存在噪声大、速比变化困难、安装和维护复杂、转矩波动较大等缺点。所以我们使用了机加工齿轮和碳纤维齿条，减少磨损带来的空程和下坠情况。其直线副所选择的是抽屉滑轨，由于其在纵向放置的时候有很好的受力情况，且可以前移很长一段距离且整体质量较轻，不会引起太多重心偏移。缺点是抽屉滑轨两侧的铝管大小需要和抽屉滑轨的型号进行适配。



图 1.5.1.1-3 机械臂 link2 示意图

Joint1 与 Link3:

Joint1 选择齿轮传动，驱动是两个 DJI M3508 电机。由于 joint1 需要翻转整个上层，所以需要很大的扭矩，于是采用齿轮提供 1: 2 的减速比来进行传动。缺点是齿轮磨损较为严重，所以依旧采用了机加工齿轮解决此问题。目前没有出现明显磨损情况。Link3 依旧采用齿轮齿条的传动方式，驱动是 DJI M3508 电机。齿轮位于 link3，与电机通过联轴器直连。这样不会影响到机械臂的兑换范围。



图 1.5.1.1-4 Joint1 与 Link3 示意图

Joint2、joint3 与 joint4:

Joint2、joint3 和 joint4 一同构成了一个三轴机械臂。由于位于整个半机械臂的末端，所需要的扭矩较小，所以连接方式都采用直连。驱动方面 Yaw 轴和 Pitch 都采用 DJI M3508 电机，Roll 轴采用 DJI M2006 电机。且每一个轴所驱动的臂长都经过精确计算，确保在 4 级难度下，也能基本完成兑换矿石的功能。

1.5.1.2 吸盘

吸盘为两个直径 45mm 的硅胶吸盘，通过吸盘自带的弹簧缓震延长矿石与吸盘的接触时间，使吸盘抽真空的时间增加，提高了空接矿石的成功率。同时采用 L 型吸盘，气路可以从侧边引出，增大 Roll 轴范围，同时缩小机械臂尺寸以适应更好的兑换角度。



图 1.5.1.2-1 吸盘示意图

1.5.1.3 底盘:

工程机器人的底盘主要由 8 根纵横交错的铝管构成，主要分为主框、救援机构、保护框、轮组、云台四部分。

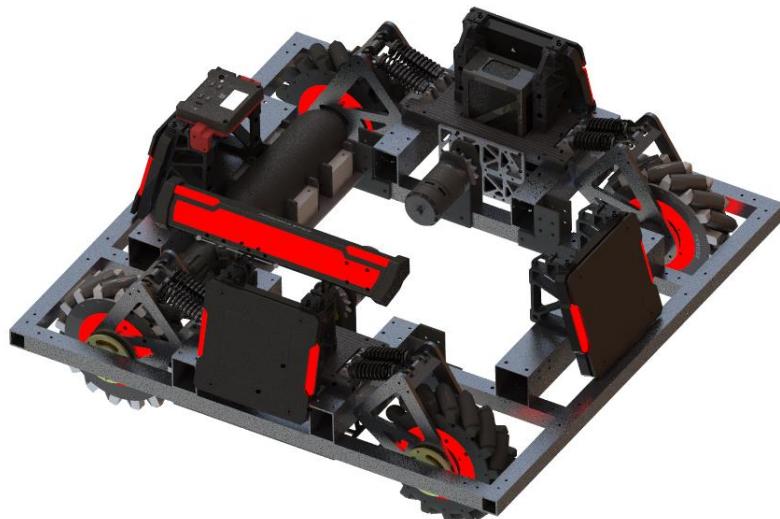


图 1.5.1.3-1 底盘示意图

铝框:

底盘铝框是底盘的主要构成部分，承担着承载气瓶，裁判系统和机械臂的作用。主框主要包括主梁，碳板，救援机构等。主梁采用薄壁粗铝方管。优点是结实耐用，非常适应 RoboMaster 激烈对抗的赛场。但是缺点是如果铝管过大会导致固定所需要的钉长度过长。所以我们最终采用了 20*20*2 和 40*40*2 的铝管，在保证连接处的强度和刚度同时具有质量轻，成本低，易于拆卸的优点。

轮组:

轮组部分采用东莞理工大学开源 HEXROLL 内嵌型麦轮，使用双边支撑，电机尽可能伸入轮子

中，减少轮组体积。电机座加工件上套一个大轴承，支撑轮子内侧。电机驱动通过胀紧套和加工件带动外侧轮圈，该加工件外有小轴承，用于支撑轮子外侧。最外侧使用碳板压紧轴承内圈。

工程机器人采用**独立悬挂的方式**。工程车移动过程中对精准度要求不太高，直接用劲度系数合适的避震器倒装做成普通的独立悬挂。由于我们的工程机器人前端搭载机械臂，整体重心靠前，特别是在取矿兑换等姿态下前移机构伸出，造成前两轮避震器压缩量过大，使得机器人整体前倾，使得取矿、兑换对准难度大，甚至在急刹车的时候有翻车的风险，对于这个问题，我们给前轮避震器换了劲度系数更大的弹簧，前倾问题有所改善，经过选型，前轮采用规格为 2.8*24*45 的弹簧，后轮采用规格为 2.5*24*45 的弹簧，保证在取矿状态下整车的平稳。

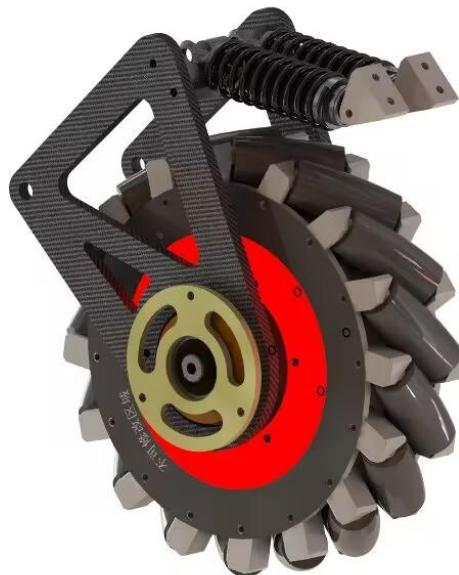


图 1.5.1.3-2 轮组示意图

救援：

本赛季新规则出台后，所有机器人都可以原地读条复活，但正常读条复活后仍然需要回补血点解锁发射机构和快速回血，而且在补血点享有四倍的复活读条速度加成。由此看来，工程机器人的救援功能仍然是必要而且十分重要的，救援机构的设计目的是可以准确连接不同种类的步兵和英雄并拖回补血点。对于今年的工程机器人救援机构，我们采用传统连杆曲柄摇杆结构，动力源选择气缸，可以在固连状态产生死点，保证可以在勾住其他机器人防护框而且在起伏路段等恶劣地形下不会断连。从实际测试效果来看，救援爪会有一定程度的晃动，主要是因为救援爪连接处没有良好的限位，气缸杆会有小幅度晃动。

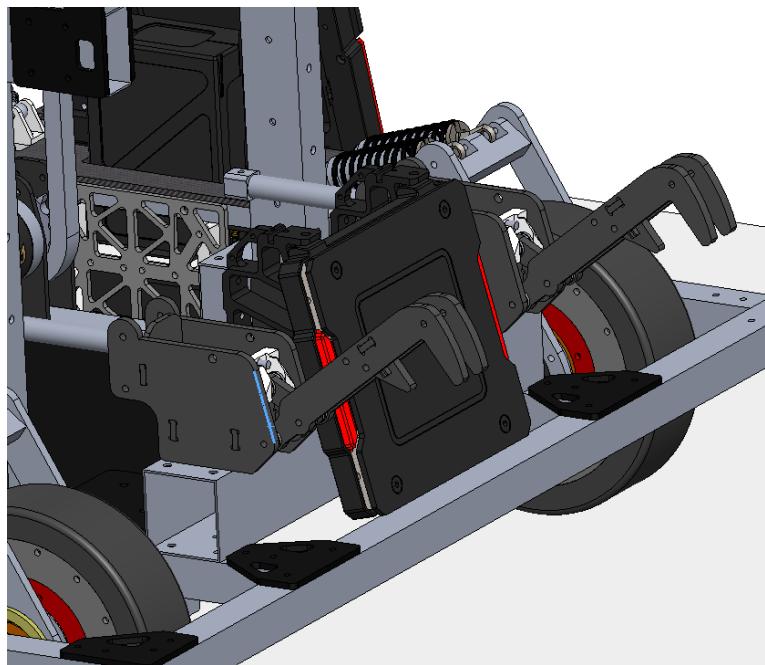


图 1.5.1.3-4 救援示意图

云台：

为了让操作手有更好的视野，实时观察战场环境，以及看大资源岛和地面矿石的情况，所以使用两个舵机的二维云台提供足够的视野。

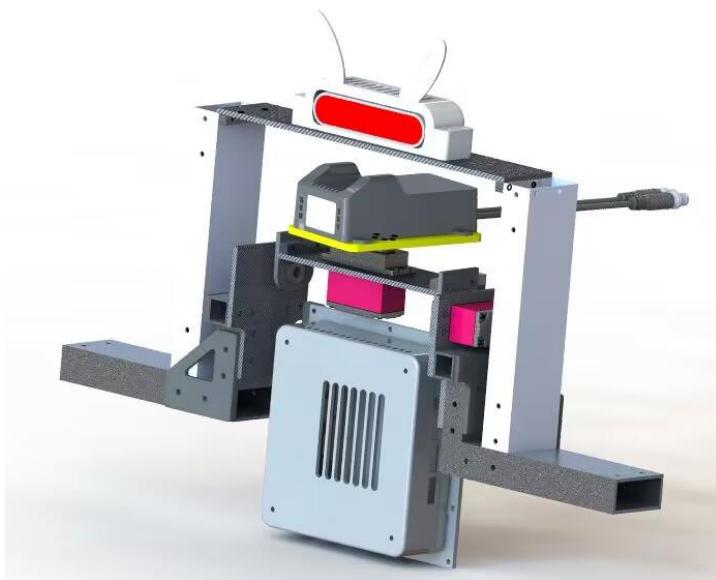


图 1.5.1.3-5 云台示意图（装 NUC 版）

1.5.1.4 裁判系统安装

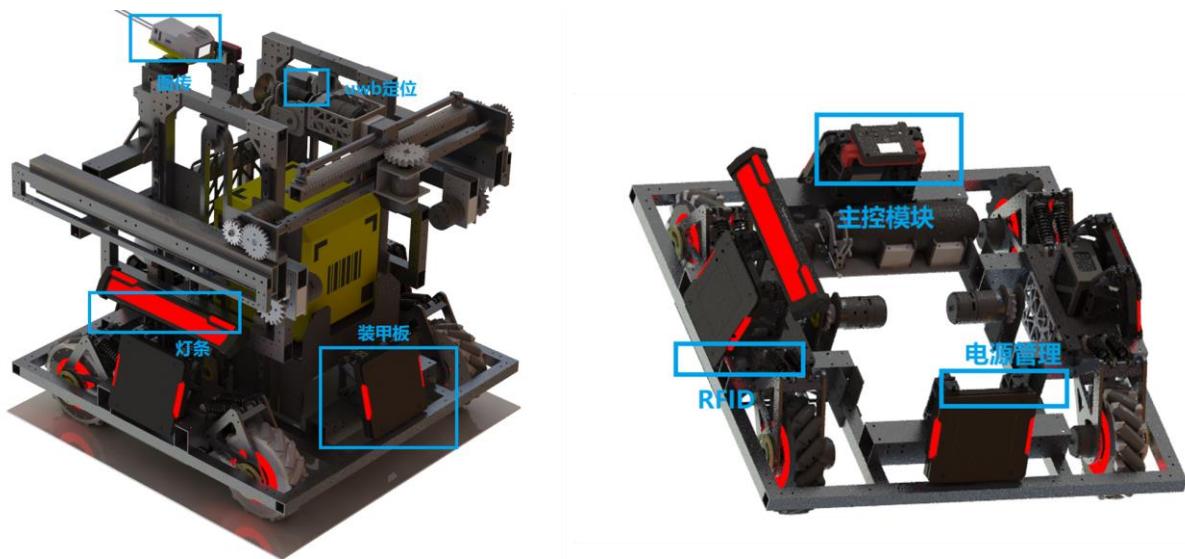


图 1.5.1.4-1 裁判系统安装示意图

1.5.1.5 工艺选择

在工程机器人的整体设计过程中，需要综合考虑机械制造的合理性和本校的加工资源情况。因此，在设计中多采用 2D 雕刻加工玻纤板和碳纤板的结构设计。同时在一些必要的铝件上进行了优化设计方案，避免复杂特征体的出现，设计出的铝件可以通过简单 CRC 机加工的方式，从而降低加工难度及成本。此外，也结合 3D 打印件进行辅助制造，以便更好地实现整体设计方案。

2D 雕刻：

工程机器人的大部分零件均为板类，底盘除去铝管主框架外，剩下的轮组均为玻纤板结构；机械臂也采用的是玻纤板加铝管的设计。工程整体设计时工艺选择 90% 均可自加工完成，实现少外包。减少因为定制零件而浪费的时间，整体设计上更加高效。

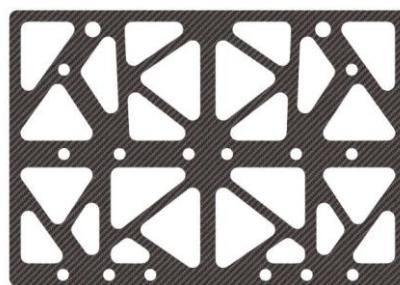


图 1.5.1.5-1 2D 雕刻件示意图

3D 打印:

对于一些拥有曲面的、强度要求不高、作平常固定非支撑件的零件，首选 3D 打印作为加工方式。



图 1.5.1.5-2 相机外壳 3D 打印件示意图

CNC 机加工:

对于强度要求高或需要特殊连接的地方，我们通常会采用加工件来实现。加工件可以根据特定需求进行个性化设计和加工制造，可以提高强度、适配我们的要求和提高灵活性等。同时，加工件通常采用数控机床进行加工，具有很高的精度和稳定性。

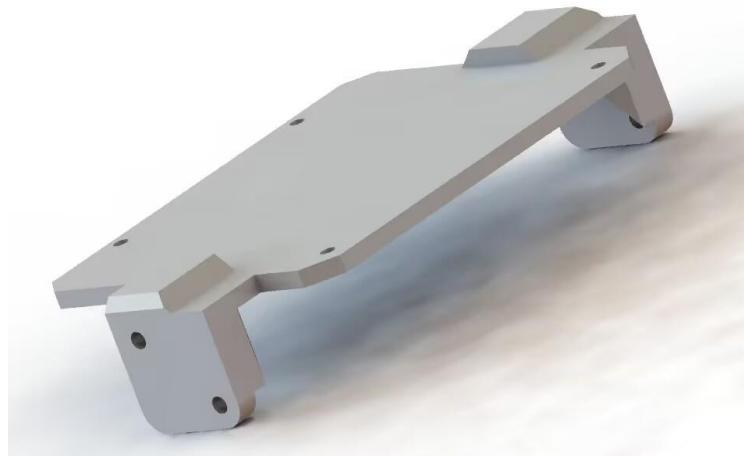


图 1.5.15-3 机械臂 Yaw 轴底座加工件示意图

1.5.2 硬件设计

机器人的电路是机器人的核心部分之一。具体来说，机器人电路的重要性主要体现在以下几个方面：

控制能力：机器人电路的设计和实现直接影响机器人的控制能力，控制电路的设计要求精准、灵敏和稳定，以确保机器人的动作和行为精准可靠；

感知能力：机器人电路中的传感器负责机器人的感知功能，通过对外部环境和内部状态的感知，机器人才能做出相应的动作和行为，因此电路中传感器的质量和性能对机器人的感知能力至关重要；

通信能力：机器人需要实现稳定的多块嵌入式载板通信、miniPC-嵌入式载板通信以及嵌入式载板-裁判系统通信；稳定的通信能力是应对高对抗强度赛场的必备条件；

可靠性：机器人电路的可靠性是机器人的稳定性和使用寿命的重要保证。电路设计要求紧凑、可靠，电路的元器件应该具有良好的质量和稳定性。

1.5.2.1 硬件框图

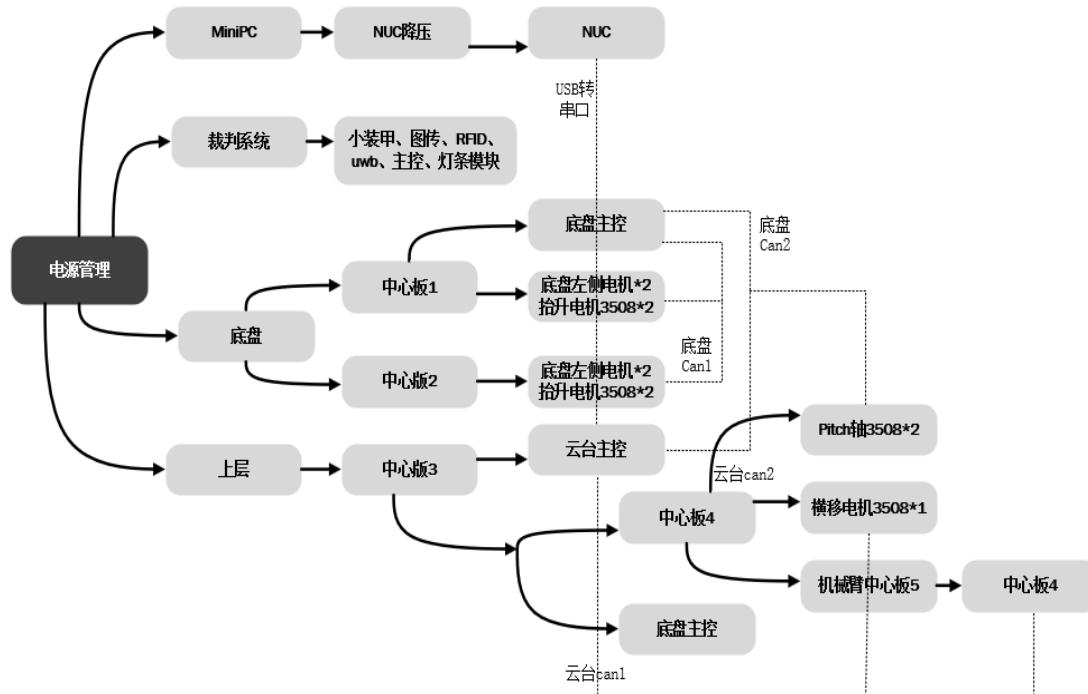


图 1.5.2.1-1 工程机器人硬件框图

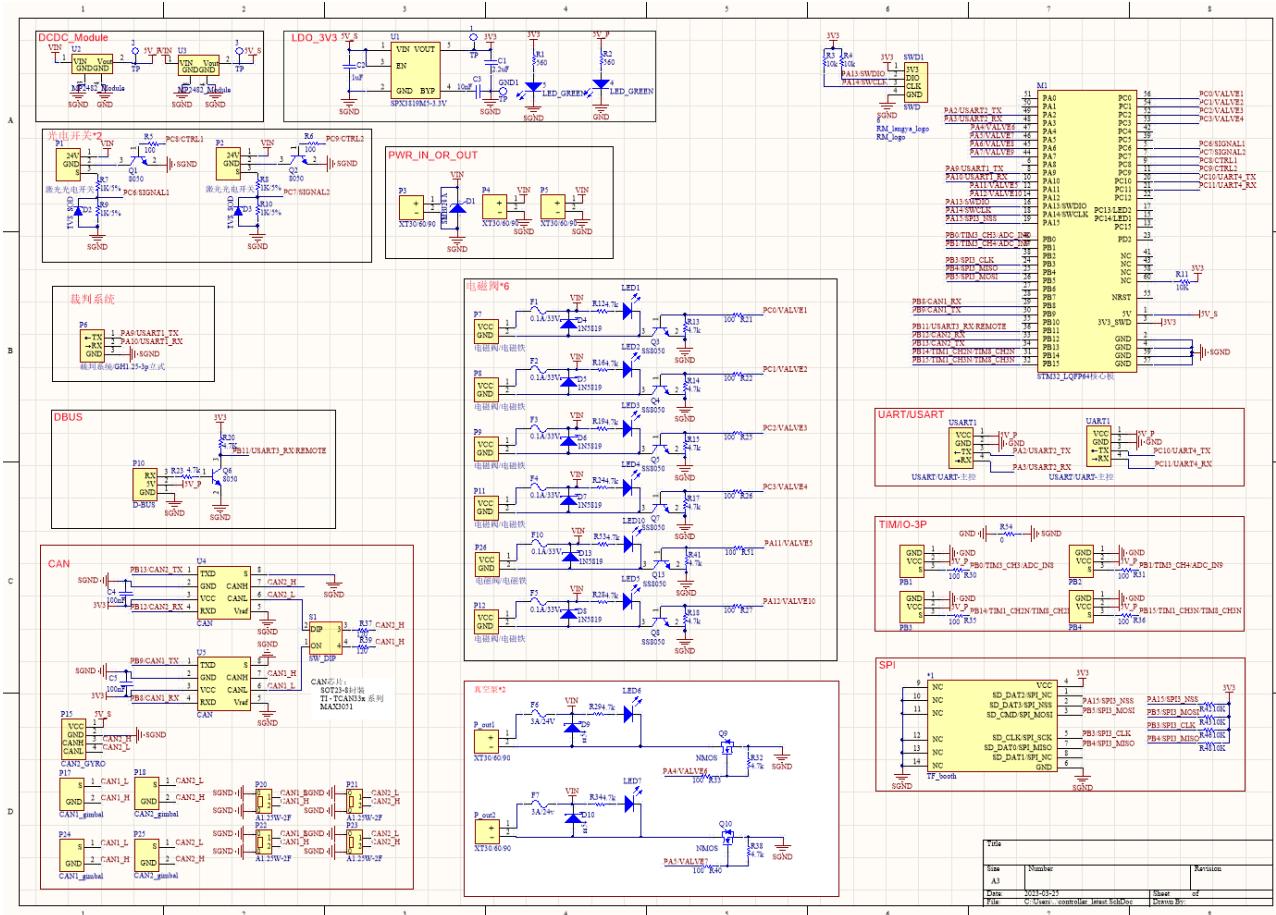
根据工程机器人的需求，底盘主控板集成了底盘电机控制、裁判系统通信、云台通信以及电磁阀控制等功能，以实现底盘的完整控制。为满足 CAN 通信的需求，该主控板搭载了两个 CAN 收发器。陀螺仪的主控则独立于底盘主控板之外，由其他单片机主控搭载，与底盘主控板之间采用 CAN 通信方式进行通信。

云台部分主要由 Gimbal 供电，并通过电机、电磁阀、真空泵等设备实现伸缩和取矿等功能。主控板内部的单片机都由开关电源搭配 LDO 电压稳定器进行 3.3V 供电，而外部设备如陀螺仪、激光等则需要更大

的过流开关电源来供电。通过这样的电路设计，可以确保电源稳定、可靠，从而保障机器人系统的正常运行。

1.5.2.2 硬件详细设计(自研)

使用工程自研主控板进行控制。该主控除最小系统外继承了 CAN、DBUS、电磁阀，真空泵等控制模块。控板整体使用模块化设计，主控使用 STM32F405RGT6，插拔式安装，5V 使用 MP2482 模块进行降压，通过 LDO 对单片机供电。



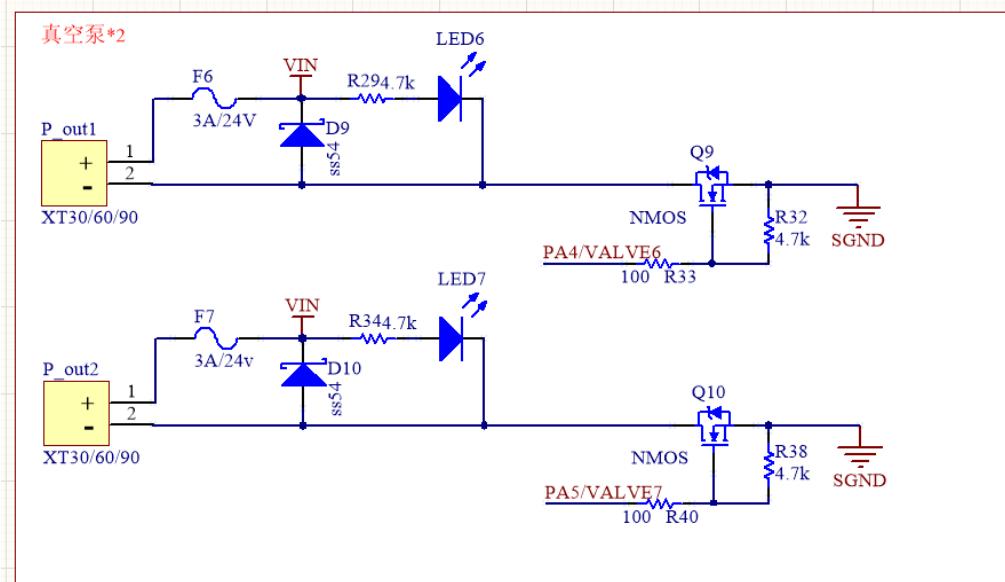


图 1.5.2.2-2 自研真空泵原理图

DBUS: 通过 BJT 实现信号取非。

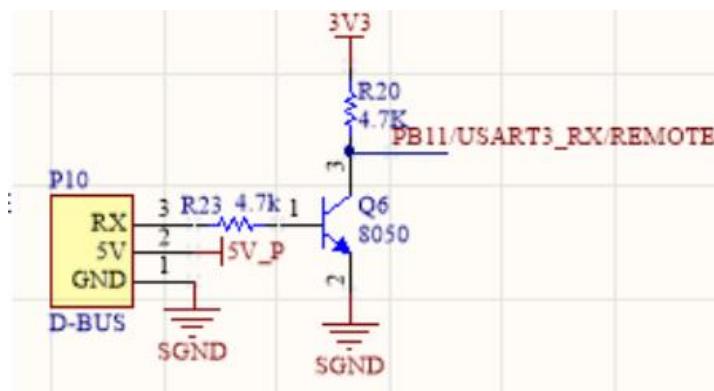


图 1.5.2.2-3 DBUS 原理图

CAN: 通过 CAN 芯片实现差分信号转换。

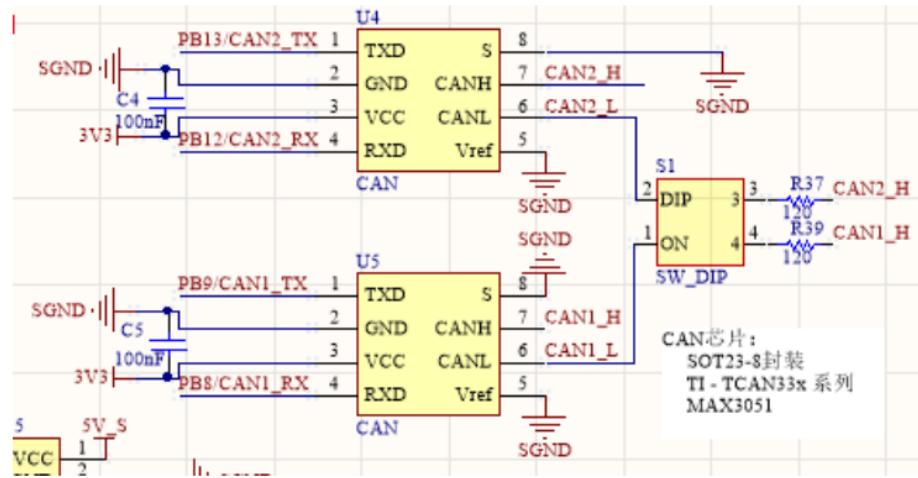


图 1.5.2.2-4 CAN 通信部分原理图

通过 SPI 加装 TF 卡作为外置存储，方便储存过程信息，帮助调试复盘

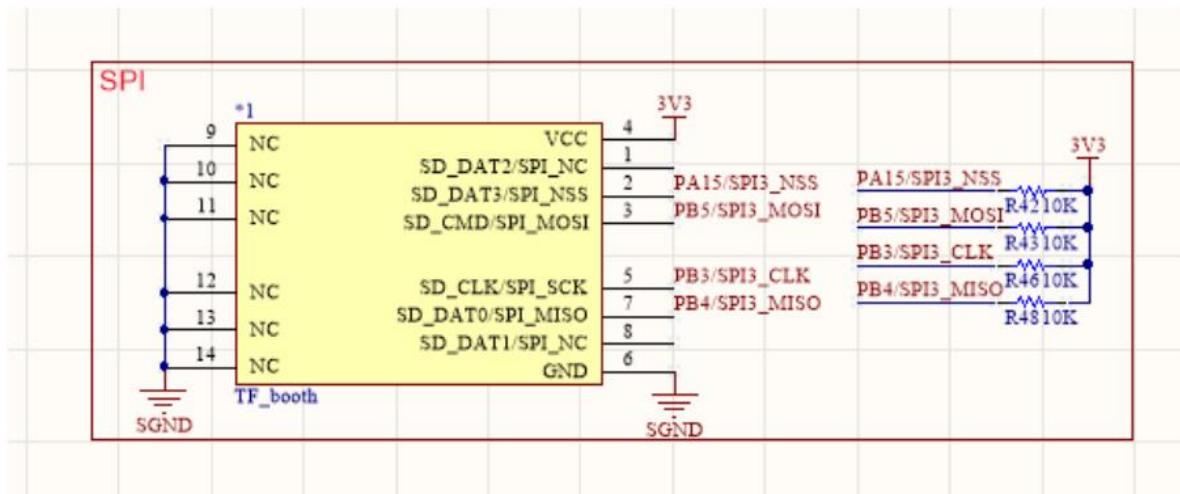


图 1.5.2.2-5 TF 卡部分原理图

1.5.2.3 自研模块以及部分模块测试

表 1.5.2.2-1 (自研)模块测试表

测试项目	测试结果
24V-5V 开关电源	使用不同模块，输入 24.0V，输出 $5V \pm 0.05V$
5V-3V3 LDO	使用上一模块输入，输出 3.32V
TIM/IO-3p	能够正常使用 TIM 与 IO 口功能
UART/USART	能够正常使用串口功能
真空泵	指示灯亮，真空泵供电正常
电磁阀	指示灯亮，电磁阀正常工作，能够切换
TF	能够正常对 TF 卡写入
DBUS	能够正常与遥控器接收机交互
稳定性测试	尝试输入低压反压，TVS 正常工作，实现电压隔离，尝试对真空泵控制接口进行低压反压及高压输入，肖特基二极管正常工作，实现隔离作用。进行晃动与轻微击打，功能正常工作

1.5.2.4 关键器件选型

真空泵 MOSFET 选型：

AO3400 是一种 N 沟道增强型场效应晶体管，采用先进的沟槽工艺，具有优异的 RDS，低门电荷和低电压驱动等特点。该器件适用于负载开关或 PWM 应用。其阈值电压 1.4V 适合 IO 口控制。24V 电压能够提供充足过驱动电压，最大连续漏源电流 5.8A 满足真空泵功率要求。器件整体参数满足控制需求。

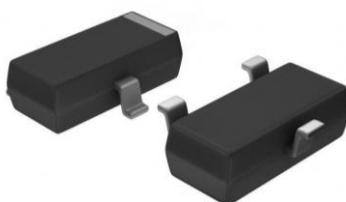


图 1.5.2.4-1 AO3400 模块示意图

除了 AO3400 以外，我们还参考了以下几个型号的 MOS 管，参数如下：

表 1.5.2.4-1 真空泵 MOSFET 选型对照表

MOS 管型号	极性	最大漏极电压	最大漏极电流	导通电阻	开关速度
AO3400	P	30V	-4.2A	22mΩ	9.5ns
AO341	P	40V	-1.5A	35mΩ	18ns
2N7002	N	60V	-0.115A	5Ω	25ns
IRF3708	N	30V	-22A	8.6mΩ	38ns
STP36NF06L	N	60V	-30A	0.047Ω	25ns

A03401: 与 AO3400 同属于 P 型 MOS 管，具有类似的低导通电阻和高开关速度等特点，但相比 AO3400，其最大漏电流较小，最大漏极电压较高。

2N7002: 与 AO3400 相比，2N7002 的最大漏电流较大，但具有更低的导通电阻和较高的开关速度，适合用于开关电源和照明控制等应用。

IRF3708: IRF3708 是一款 N 型 MOS 管，与 AO3400 不同，其具有较大的最大漏电流和漏极电压，但导通电阻较小，具有较好的导通性能和可靠性，适用于电源管理和电机驱动等领域。

STP36NF06L: STP36NF06L 也是一款 N 型 MOS 管，其具有较高的最大漏极电压和较小的导通电阻，适用于功率电子和电机驱动等领域

综合以上几个参数和 MOS 管的优缺点及价格因素，我们最终选择了 A03400。

相机选型：

我们选取了 MER2-160-227U3M，其是一款工业相机，具有高分辨率，分辨率为 1600x1200，且有很高的帧率，最大帧率为 227 fps，可满足高速拍摄需求。使用 USB3.0 接口，相比于 USB2.0，USB3.0 的传输速度更快，更稳定，可提高数据传输效率和图像质量。但是其也有相应的缺点，比如价格昂贵以及体积大。但是由于新赛季工程有很多的空间，所以体积不是很大的难题，所以我们最终选用了这款相机。



图 1.5.4.2-1 MER2-160-227U3M 相机示意图

同时我们也参考了同类型的很多相机，其参数横向对比如下：

表 1.5.4.2-2 相机选型对照表

相机型号	分辨率	帧率(fps)	感光元件尺寸	图像传感器	最大灵敏度	传输口
FLIR Blackfly S BFS-	1.2MP	50	1/3	Sony IMX264	2000mV/lx	USB3.0
Basler ace acA1920	2.3MP	40	2/3	Sony IMX174	2000 mV/lx	GigE
Teledyne DALSA Genie	1.6MP	50	1/2.9	Sony IMX273	1300 mV/lx	GigE
IDS Imaging UI-3160CP	3.2MP	50	1/1.8	Sony IMX265	1500 mV/lx	USB3.0
AVT Stringray F-145B	1.4MP	35	1/1.8	Sony ICX267	2800 mV/lx	FireWire

表 1.5.4.2 工程关键器件选型表

器件类型	选型
主控芯片	STM32F405RGT6;
24V 转 5V 稳压	MP2482、MP2451
5V 转 3V3 LDO	SPX3819M5-3.3L
TVS	SMBJ24A, SMAJ26A
USB 转串口芯片	CP2102
CAN 收发器	TCAN33x, MAX3051
MOS	CSD18543, CSD18532, AO3400, AO3401, SS8050, SS8550
陀螺仪	ICM20602, QMC5883L
晶振	8MHZ, 3225/5032 封装
二极管	IN5819, 1N4007, 1N4148, SS54

1.5.3 软件设计

1.5.3.1 系统架构

软件方案首先要确认控制的可行性。于是我们在设计机械结构的同时使用 MATLAB 仿真，根据仿真结果得到电机扭矩范围和半机械臂的运动学逆解，来确认控制方案的可行性。下图是使用 MATLAB 对机械臂进行的仿真，其中机械臂的数据采用机械设计的真实数据，完全还原了我们机械臂的运动状态。下图是 MATLAB 内的机械臂和运动位置点云。以及针对完成仿真的运动学逆解部分代码：

图 1.5.3.1-1 MATLAB 仿真图及运动位置点云图

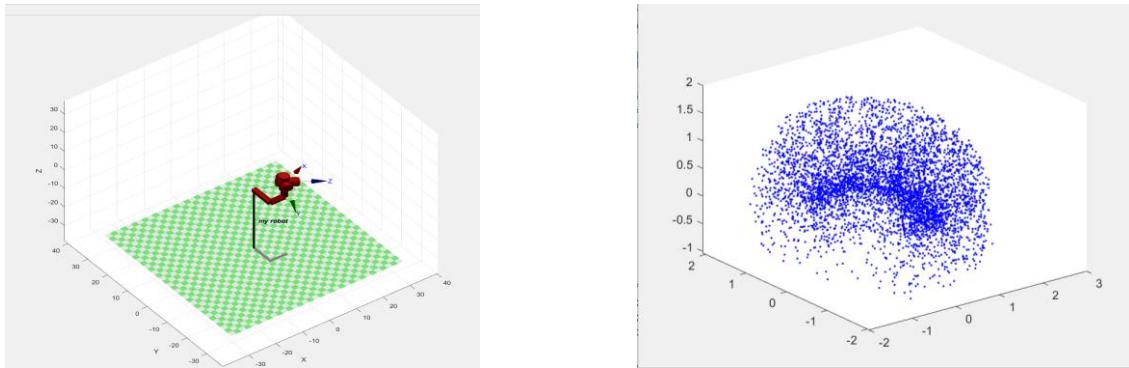


图 1.5.3.1-2 仿真之后确定的运动学逆解代码（部分）

```
void dhTransform(DH_Single DH , double T[4][4]) {
    double theta=DH.theta;
    double alpha=DH.alpha;
    double a=DH.a;
    double d=DH.d;

    double sinTheta = arm_sin_f32(theta);
    double cosTheta = arm_cos_f32(theta);
    double sinAlpha = arm_sin_f32(alpha);
    double cosAlpha = arm_cos_f32(alpha);

    T[0][0] = cosTheta;
    T[0][1] = -sinTheta * cosAlpha;
    T[0][2] = sinTheta * sinAlpha;
    T[0][3] = a * cosTheta;

    T[1][0] = sinTheta;
    T[1][1] = cosTheta * cosAlpha;
    T[1][2] = -cosTheta * sinAlpha;
    T[1][3] = a * sinTheta;
```

}

完成仿真确认可行性之后，在设计软件架构时需要综合考虑外部系统接口、用户界面的设计以及逻辑实现和数据存储，采用 FreeRTOS 操作系统实现多任务控制，使用团队统一的通讯协议来提高代码的可移植性。

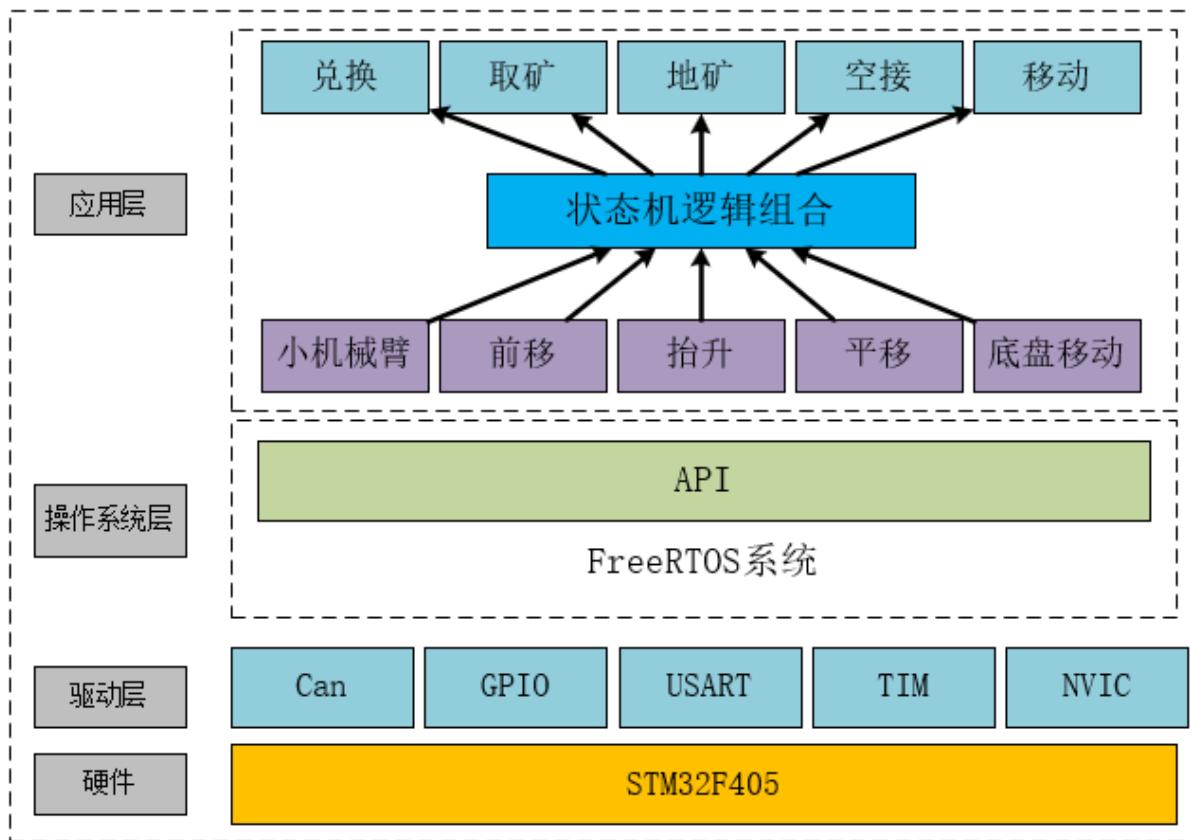


图 1.5.3.1-3 软件部分层级架构

今年由于规则修改，没用采用主控制板和次控制板，而是使用了分布式主控配置，其可以控制多个电机、救援模块、与裁判系统和遥控器的通讯。在确定单片机等方面，考虑需要用到 CAN 通讯、IO 口、USART 通讯、I2C 等外设。同时需要用到的 FLASH 大小在 100KB 左右，算力方面较强的单片机。于是最终确定使用 F405 中心版。

最后，再上赛季的代码框架基础上，融合入本赛季实现的仿真，确定了代码的整体框架如图 1.5.3.1-3。

软件开发我们主要使用了 Keil 作为嵌入式开发平台，同时辅助以 MATLAB 和 Ozone 仿真支持。Keil 是一款用于嵌入式系统开发的集成开发环境（Integrated Development Environment，简称 IDE）。Keil 专注于微控制器（Microcontroller，简称 MCU）的软件和硬件开发，尤其适用于基于 ARM Cortex-M 和 8051 系列微控制器的项目。Keil 提供了 C/C++ 编译器、汇编器、调试器、仿真器等一系列开发工具，方便工程师进行嵌入式系统设计、调试和测试。

MATLAB（Matrix Laboratory），其广泛应用于科学研究、工程设计、数据分析等领域。MATLAB 提供了丰富的数学函数库、图形绘制功能和编程语言，支持矩阵运算、信号处理、图像处理、控制系统设计

等多种应用。

Ozone 是由 SEGGER 公司开发的一款功能强大的嵌入式系统调试器。它与 SEGGER J-Link 和 J-Trace 调试探针兼容，支持基于 ARM Cortex-M、R 和 A 系列处理器的系统开发。Ozone 提供了源代码级别的调试、代码覆盖率分析、性能分析等功能。

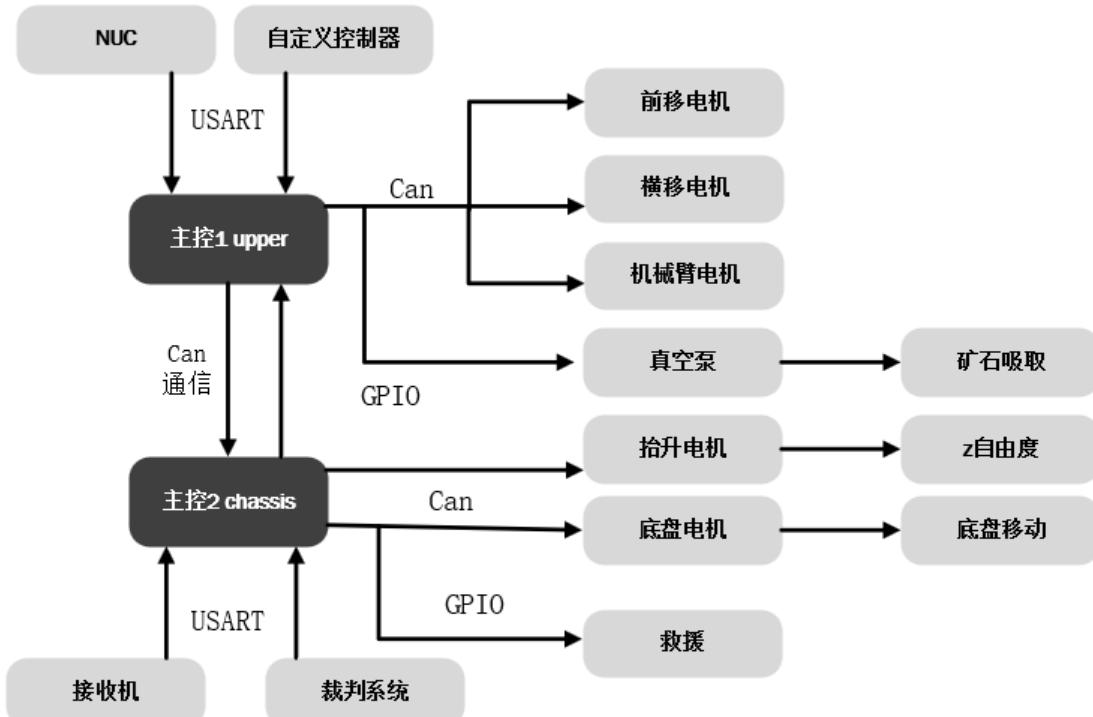


图 1.5.3.1-4 软件逻辑框架图

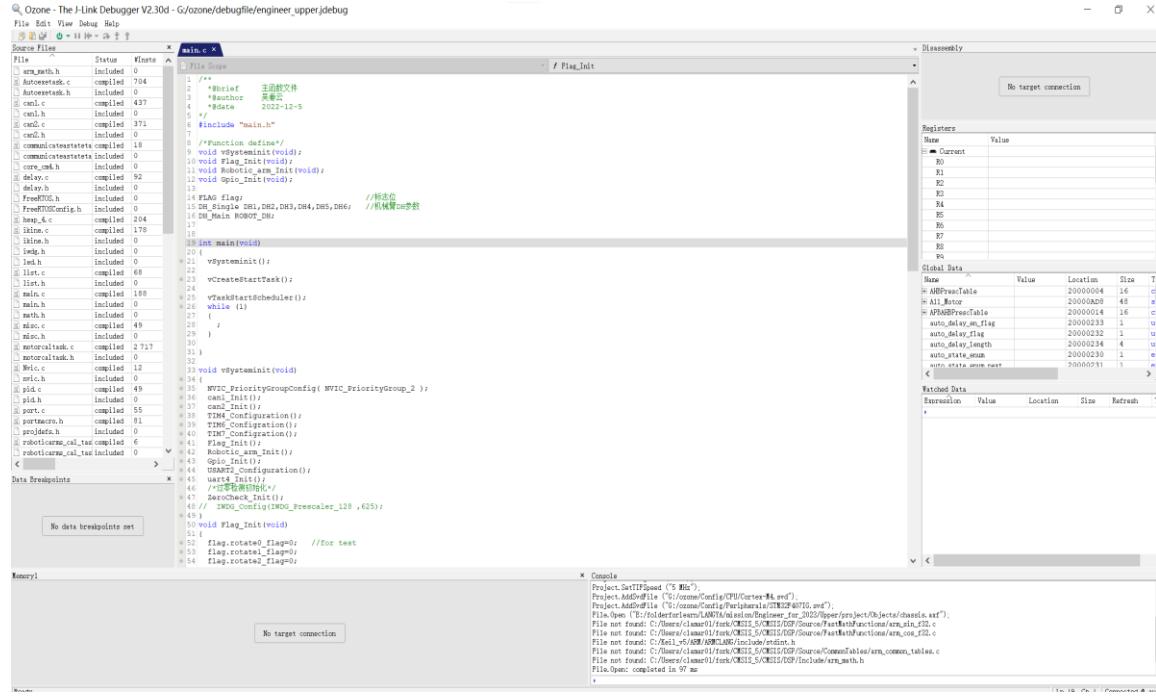


图 1.5.3.1-4 Ozone 操作界面

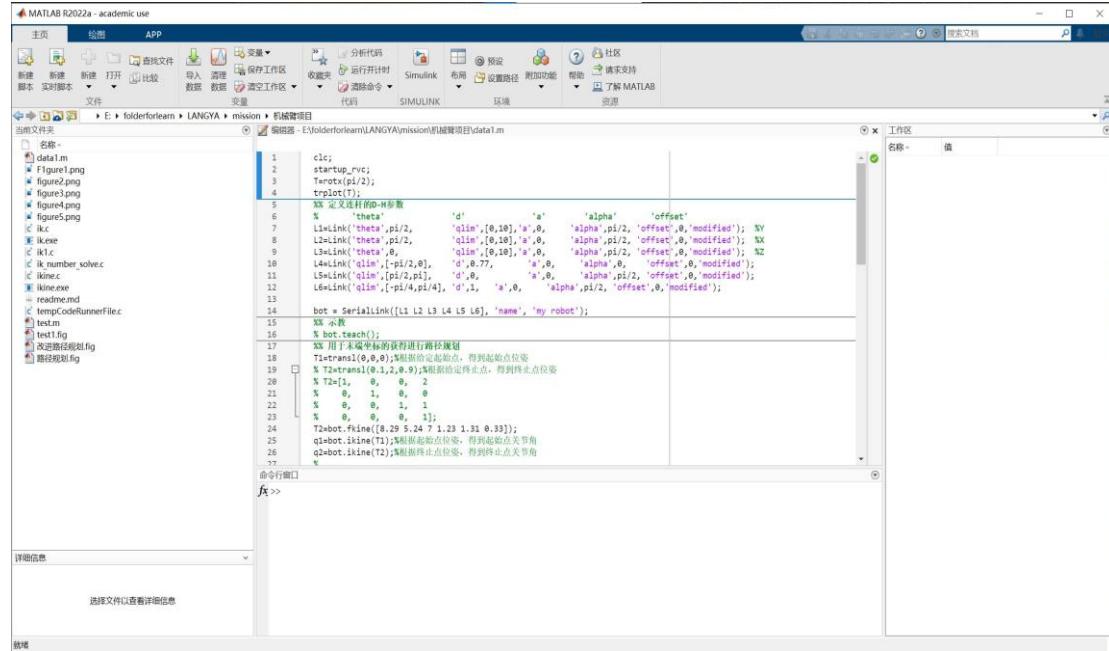


图 1.5.3.1-5 MATLAB 操作界面

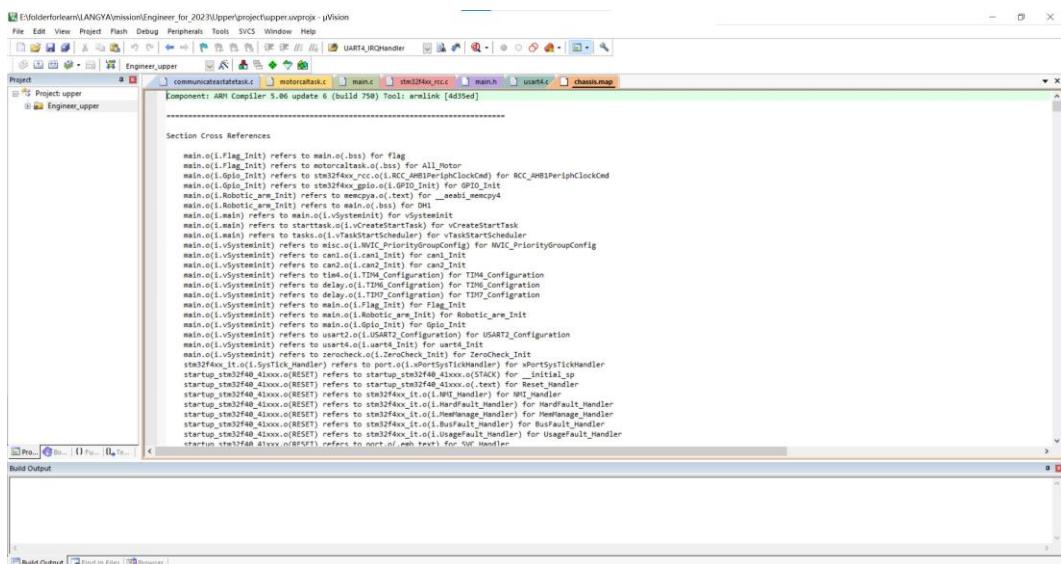


图 1.5.3.1-6 Keil 操作界面

1.5.3.2 运行流程

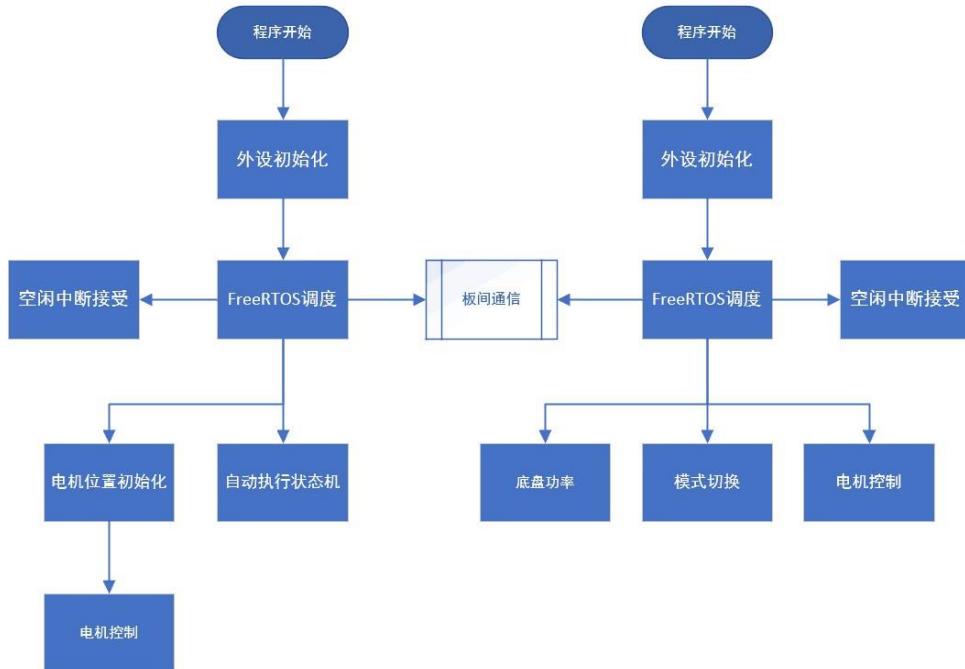


图 1.5.3.2-1 板间运行流程示意图

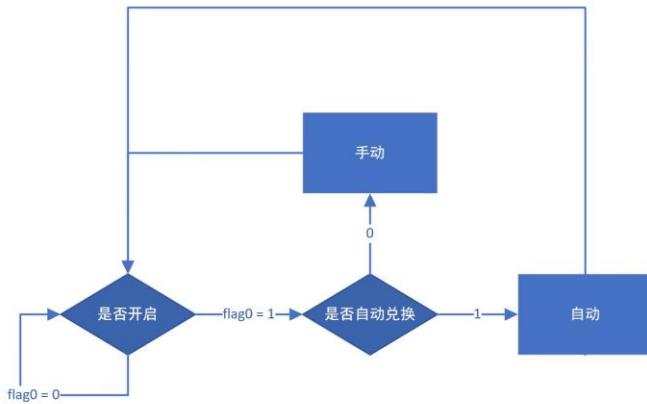


图 1.5.3.2-2 兑换逻辑流程示意图

1.5.3.3 重点功能

底盘功率限制功能: 虽然工程在比赛规则中没有对底盘功率进行限制，但是如果底盘整体电流过大电源管理模块会自动切断电源，导致工程车在场上突然断电。所以在代码中依旧有着对工程车底盘电流大小的限制。

控制平滑化多元化: 如果是采用阶跃函数的形式对电机进行控制，无论是上层还是底盘，都可能会存在一定的问题。以底盘举例，阶跃函数的启停控制，不但可能会使轮子出现打滑的现象，还很大概率会出现大幅度超功率耗尽缓存能量。因此，我们在对于阶跃函数形式的控制信号，我们都采用了简单方便实现的斜坡函数来对信号平滑化处理。同时底盘有两套参数进行控制，使工程在取矿的对准过程中稳定精确的移动，同时在掩护队友的时候能展现出充分地机动性。

离线检测功能: 为了避免 IMU 或者电机等模块通信短线导致的机器人失控等危险情况的发生，提高系统的安全性。我们通过 FreeRTOS 提供的 API 来获取每次电机或者是 IMU、PC、遥控器等更新数据时间，然后在一个固定频率运行的任务中对这些数据更新状态进行处理。若超过一定时间，模块数据没有更新，则认为该模块离线，立即挂起与该模块有关的任务，避免异常工作造成危险。当模块再次检测到的时候，则恢复任务的正常运行。极大的提高了安全性和调试时对模块离线快速判断的速度。

1.5.3.4 软件测试

软件测试和调试首先在仿真环境中进行，确保代码逻辑的合理性，以防止上车调试时出现各种问题；然后使用单片机从下到上依次单独控制各个模块，确保每个模块能够正常运行；最后进行各模块的联调工作，同时测试机械和电路的设计是否合理和正常工作。

测试项目一：

测试名称: 软件控制基本测试

测试时间: 2022.12.8

测试功能: 底盘移动、抬升、前移、机械臂、真空泵、救援（机械臂需测试兑换角度）

测试地点: 实验室测试场地

测试办法: 单独测试每个模块的运行情况，PID 情况，运行稳定性测试。

测试人员: 吴垂云、王世康、刘旭东、李宜桐、丁硕

测试结果: 除前移无法达到倾角小于 2 度以外，PID 较稳定其余都达到预期标准，其中机械臂的最大测试角度如下：

Yaw: - 90 至 + 90度

Pitch: - 90 至 + 75度

Roll: - 45 至 + 45度

测试项目二：

测试名称: 嵌软联调以及逻辑测试

测试时间: 2023.3.12

测试功能: 连续取矿逻辑，空接逻辑，地矿逻辑，视觉联调兑换

测试地点: 场地

测试办法: 运行稳定性测试。

测试人员: 吴垂云、王世康、刘旭东、李宜桐、丁硕

测试结果: 除视觉算法坐标系出现错误外，其余软件逻辑运行良好，可以实现比赛要求。

1.5.4 算法设计

1.5.4.1 功能简介与 pipeline

本算法主要实现了对于兑矿站的兑矿框特征点识别与位姿解算，达到与下位机机械臂控制算法耦合实现自动兑框功能的目的。

简单流程图如下：

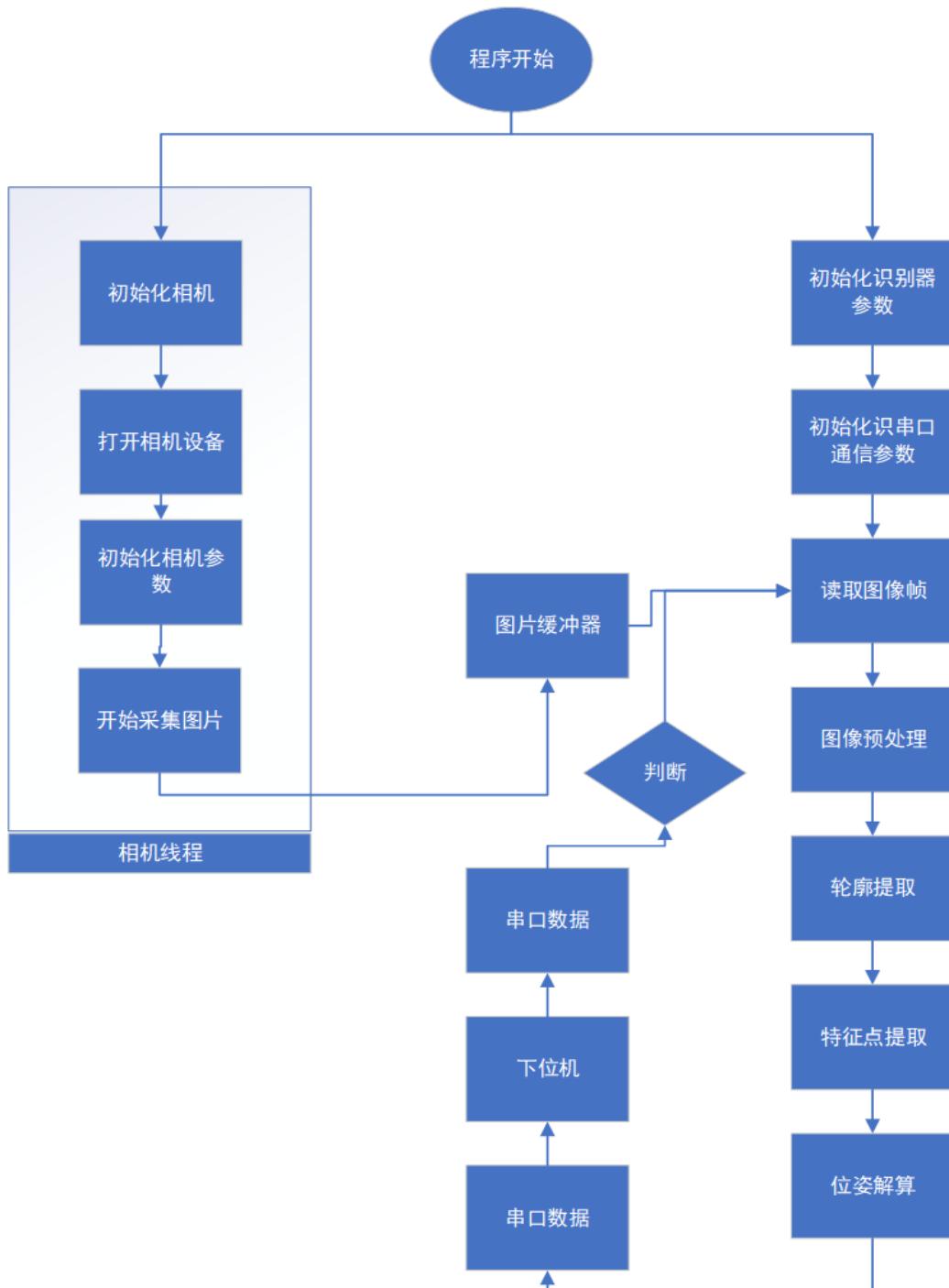


图 1.5.4.1-1 算法整体流程图

1.5.4.2 算法原理

深度图:

1.简介:

深度图 (Depth Map) 是一种图像类型, 它包含了场景中每个像素点到相机的距离信息。通常, 深度图使用灰度图像表示, 黑色表示远离相机, 白色表示靠近相机。深度图广泛应用于计算机视觉、机器人技术、虚拟现实、增强现实等领域中。

2. 双目相机：

在工程车中，我们使用双目相机 realsense d435 来获取深度图。

双目相机是一种通过两个摄像头同时获取场景信息的相机系统。它的基本原理是利用两个摄像头分别拍摄同一场景，然后通过计算两个摄像头的图像之间的差异，得到场景的深度信息及三维信息。相机系统需要通过校正来调整左右摄像头的视角，使得摄像头之间的对应点在同一行，这样才能准确地计算出深度信息。

2.1 结构与参数：

realsense D435 是一款立体追踪解决方案，采用的是结构光 Tof 成像，可为各种应用提供高质量深度。它的宽视场非常适合机器人或增强现实和虚拟现实等应用。这款外形小巧的摄像头拍摄范围高达 10 米，采用英特尔实感 SDK 2.0，并提供跨平台支持。

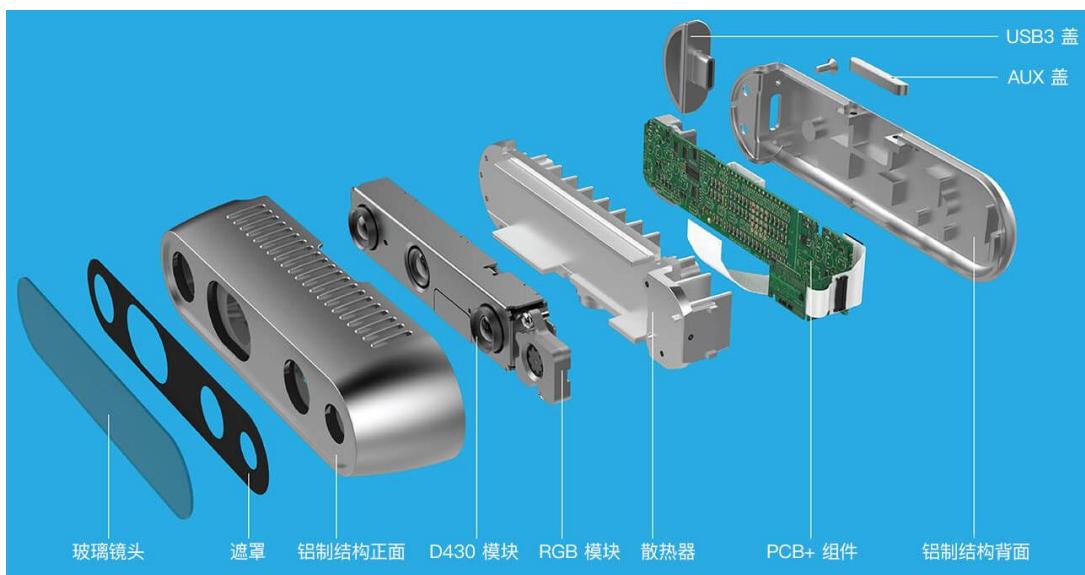


图 1.5.4.2-1 realsenseD435 内部结构图

Use Environment	Indoor/Outdoor
Depth Technology	Active IR stereo
Main Intel® RealSense™ component	<ul style="list-style-type: none"> - Intel® RealSense™ Vision Processor D4 - Intel® RealSense™ module D430
Depth Field of View (FOV) (Horizontal x Vertical x Diagonal)	$87^\circ \pm 3^\circ \times 58^\circ \pm 1^\circ \times 95^\circ \pm 3^\circ$
Depth Stream Output Resolution	Up to 1280 x 720
Depth Stream Output Frame Rate	Up to 90 fps
Minimum Depth Distance (Min-Z)	0.1 m
Sensor Shutter Type	Global Shutter
Maximum Range	Approx. 10 meters; Varies depending on calibration, scene, and lighting condition
RGB Sensor Resolution and Frame Rate	1920 x 1080 at 30 fps
RGB Sensor FOV (Horizontal x Vertical x Diagonal)	$69.4^\circ \times 42.5^\circ \times 77^\circ (+/- 3^\circ)$
Camera Dimension (Length x Depth x Height)	90 mm x 25 mm x 25 mm
Connectors	<ul style="list-style-type: none"> - USB-C® 3.1 Gen 1 - One 1/4-20 UNC thread mounting point - Two M3 thread mounting points
Mounting Mechanism	

图 1.5.4.2-2 realsenseD435 相机参数

2.2 成像原理:

目前深度相机的实现原理主要分为三种：分别是结构光，Tof，双目成像。

realsenseD435 使用的是结构光的方案。正面的四个摄像头，从左向右以次是左红外相机，红外点阵投射仪，右红外相机，和 RGB 相机。

结构光的原理是：在激光器外放置一个光栅，激光通过光栅进行投射成像时会发生折射，从而使得激光最终在物体表面上的落点产生位移。当物体距离激光投射器比较近的时候，折射而产生的位移就较小；当物体距离较远时，折射而产生的位移也就会相应的变大。这时使用一个摄像头来检测采集投射到物体表面上的图样，通过图样的位移变化，就能用算法计算出物体的位置和深度信息，进而复原整个三维空间。

2.3 开发库介绍:

librealsense.h 是 Intel Realsense D435 深度相机的开发库，提供了丰富的 API 函数来控制和操作该相机，以下是一些常用的 API 函数：

rs2::context：上下文对象，用于连接和管理相机设备。

rs2::device：相机设备对象，用于配置和操作相机硬件。

rs2::pipeline：管道对象，用于启动和停止数据流和数据处理。

rs2::frame：帧对象，用于从相机设备获取图像数据和深度数据等。

`rs2::config`: 配置对象，用于设置相机采集参数和过滤器等。

`rs2::pipeline_profile`: 管道配置对象，用于管理数据流和处理流程。

`rs2::stream_profile`: 数据流配置对象，用于描述数据流的属性和参数。

`rs2::processing_block`: 数据处理对象，用于对图像数据和深度数据进行滤波和转换等处理操作。

`rs2::align`: 对齐对象，用于将深度图像与彩色图像对齐，以便进行更准确的计算。

`rs2::pointcloud`: 点云对象，用于将深度数据转换为三维点云模型。

除此之外，还有很多其他的 API 函数，例如设置和获取相机参数、保存和加载数据等。这些 API 函数可以通过 C++ 和 Python 等编程语言调用，帮助开发者更方便地使用 Realsense D435 相机进行深度图像采集和处理。

图像预处理:

图像预处理是指对图像进行一系列的预处理，如去噪、增强等，以便更好地进行后续的图像处理工作。图像预处理对于实现准确的图像处理和计算机视觉应用是非常重要的。

1. 去除噪声：

在图像采集和传输的过程中，由于各种因素的干扰，图像中常常会出现各种噪声，如高斯噪声、椒盐噪声等。这些噪声会极大地影响后续处理的结果，所以在进行图像处理之前，需要将图像中的噪声去除或降低到一个可接受的水平。下面是几种常见的图像去噪算法：

1.1 均值滤波：

均值滤波是一种简单的线性低通滤波算法，常常用于消除高斯噪声。该算法的原理是将图像中每一个像素的值，替换成它邻域内像素灰度值的平均数。因为高斯噪声的平均值为 0，因此可以用均值滤波来消除高斯噪声。但是，该算法在消除噪声时也会减少图像的细节信息。

1.2 中值滤波：

中值滤波是一种非线性滤波算法，它用邻域内像素的中值替代每个像素的值。中值滤波的优点在于可以保留图像边缘和细节信息，对于椒盐噪声等脉冲型噪声的消除有更好的效果。但是，该算法可能会在一些情况下导致图像变得模糊。

1.3 双边滤波：

双边滤波是一种非线性滤波算法，它结合了高斯滤波和中值滤波的优点，可以消除噪声的同时保留图像的细节信息。该算法的原理是基于位置和灰度值两个因素，定义一个滑动窗口。计算窗口内所有像素的带权平均值，其中权值由距离和灰度值两个因素共同决定。因此，对于椒盐噪声和高斯噪声都有较好的处理效果。

1.4 小波去噪:

小波去噪是一种分段线性滤波算法。该算法的思想是将图像分解成多个尺度的子带，然后根据各自的统计特性和滤波器，利用统计建模的方法去除各个尺度上的噪声，最后通过重构将所有子带合并，得到去掉噪声的图像。该算法适用于不受高斯噪声影响较大的场景。

2. 增强图像对比度:

一些环境下，图像的光照不均匀，或者是图像中的一些区域光照较弱，对于后续处理会产生影响，所以需要对图像进行增强。增强图像并均衡化光照可以帮助后续图像处理算法精确分析区域的目标信息。以下是几种常见的提高图像对比度的算法：

2.1 线性拉伸:

线性拉伸算法是一种简单的对比度增强算法，基于对比度的简单定义所设计。该算法的原理是将图像的灰度范围从最小值到最大值进行线性映射，同时保持图像的灰度分布不变。



图 1.5.4.2-3 2%线性拉伸效果对比

2.2 直方图均衡化:

直方图均衡化是一种通用的对比度增强方法，可以通过直方图变换来改变图像的亮度和对比度。该算法的原理是：将图像的灰度值映射到一个均匀分布的直方图中，使得灰度值能够得到充分的利用。该算法对于在图像中出现频率较高的灰度值进行降低，对于出现频率较低的灰度值进行提高，有效地增加了图像的对比度。



图 1.5.4.2-4 直方图均衡化效果对比

2.3 自适应直方图均衡化：

自适应直方图均衡化是一种改进的直方图均衡化算法，它基于像素周围区域的平均值，调整亮度和对比度，以达到更好的增强效果。因此，它可以防止一些本来亮度很高的图像区域在增强后反而出现细节损失的情况。自适应直方图均衡化的缺点是计算较为复杂，可能导致处理速度较慢。

2.4 对比度受限自适应直方图均衡化：

对比度受限自适应直方图均衡化是一种改进的自适应直方图均衡化算法，它能够更好地处理灰度不均和噪声图像，特别是在低对比度情况下，它能够保留图像的质量和细节。该算法的主要思想是通过限制像素灰度值的最大和最小值来避免图像在处理之后的过度增强，从而更好地保留图像的细节信息。

以下是普通直方图均衡化、自适应直方图均衡化、限制对比度自适应直方图均衡化处理的图像区别：

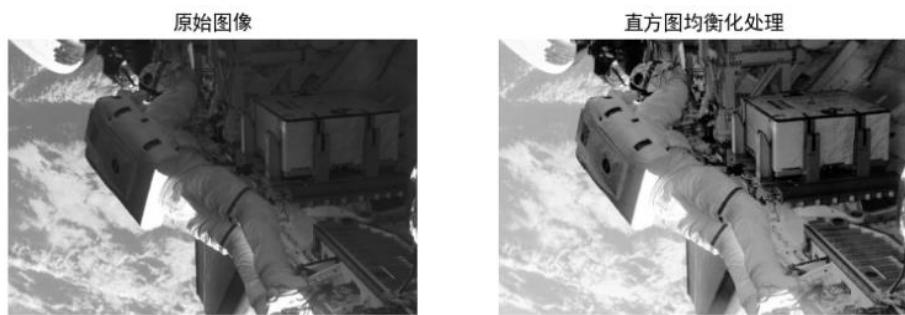


图 1.5.4.2-5 自适应直方图均衡化效果对比

3. 图像二值化：

图像二值化是一种常见的图像预处理方法，它将图像中的灰度级别转换为黑白二值图像，使得处理后的图像更加易于分析。图像二值化的应用范围很广泛，例如数字识别、字符识别、目标检测等领域。下面将简要介绍几种常见的图像二值化算法：

3.1 全局阈值法:

全局阈值法是最简单的二值化方法之一。该算法的原理是，选择一定的全局阈值，将该阈值以下的像素设为黑色（0），将该阈值以上的像素设为白色（255）。当然这个值某些时候需要通过人工调参来获得更好的效果。全局阈值法的主要优点是简单直观，没有过多的计算。但是，该算法对于像素灰度分布不均、灰度值变化较大的图像，可能会导致目标边缘模糊。

3.2 基于直方图的自适应阈值法:

基于直方图的自适应阈值法是一种适应性二值化方法。该算法的原理是，根据图像不同区域的像素统计信息，自适应地选取不同的阈值来进行二值化处理。具体实现过程是，将图像分割成多个子区域，在每个子区域中选取一个局部阈值，进行二值化处理。这种方法针对灰度变化较大、光照不均的图像具有较好的效果，但是计算量较大。

3.3 基于能量函数的阈值法:

基于能量函数的阈值法是一种典型的图像阈值分割方法，它通过对图像中像素之间的距离和灰度差等因素计算得到一定的能量值，从而确定最优阈值。该算法的流程是，先对图像计算得到能量函数值，然后选择合适的分割阈值，将图像分成两个子区域，重复上述步骤直到满足停止条件。该方法适用于背景均匀、目标光照不均匀的图像。

3.4 基于聚类的阈值法:

基于聚类的阈值法是一种基于灰度级别的阈值分割方法，它根据目标和背景的灰度级别在像素空间中进行聚类，从而得到最优的阈值。该算法的流程是，先初始化聚类中心，计算每个像素与聚类中心的距离，将像素分配到最近的聚类中心，更新聚类中心的值，重复上述过程直到满足停止条件。该方法适合于目标和背景的灰度级别明显分离的图像。

4.颜色空间:

颜色空间，又称为色彩模型，是一种数学模型，用于表示和描述颜色。它包含了一组用于表示颜色的坐标系、颜色分量值以及对颜色的解释方式。下面是常见的几种颜色空间：

4.1 RGB 颜色空间:

RGB 颜色空间是红、绿、蓝三个颜色通道的组成，由于 RGB 颜色空间是基于光的三基色模型，因此在显示器、照相机、电视等电子设备上得到了广泛应用。在 RGB 颜色空间中，每个颜色值的范围是 0-255，表示颜色通道的强度。由于 RGB 颜色空间是基于光的三原色模型，因此它对于实现光学特效、显色、对比度调整、高光和阴影效果的处理效果优秀。

4.2 CMYK 颜色空间:

CMYK 颜色空间是青、品红、黄、黑四色通道的组成，CMYK 颜色空间主要应用于印刷等产

业，也被称为印刷四色模型。在 CMYK 颜色空间中，每个颜色通道的数值表示颜料中该颜色成分的浓度。通过调整其中某一个通道的值，可以实现颜色的选择和调整。CMYK 处理可以使印刷品的色彩值更加准确，还可以通过印刷技术和纸张功效来调整颜色效果，达到更高的图像品质。

4.3 YUV 颜色空间：

YUV 颜色空间是一种模拟电视信号的颜色空间，由亮度(Y)和色度(U、V)三个分量组成。YUV 颜色空间中 Y 分量表示图像像素的亮度，U、V 表示色度，用来描述颜色的饱和程度和色彩。YUV 颜色空间主要用于视频压缩和处理领域。可以通过提取亮度和色度信息，实现视频信号的压缩和优化，常常被用于数字视频处理的编解码算法。

4.4 HSV 颜色空间：

HSV 颜色空间是一种直观的颜色空间，由色相(H)、饱和度(S)、亮度(V)三个分量组成，其中色相表示颜色的基本属性，饱和度表示颜色饱和度的高低，亮度表示颜色的亮度属性。HSV 颜色空间用于图像处理中颜色选择和分离等方面。它可以直观地对于颜色进行描述，调整颜色分量的值可以方便地进行色彩选择和区分，使得颜色识别更加准确。在颜色分割领域中，HSV 颜色空间能够有效地分离颜色信息，并进一步实现图像的定位和追踪。

5.形态学处理：

图像形态学处理是机器视觉领域中的重要内容之一。不同于传统的图像处理方式，图像形态学处理采用结构元素来操作和处理图像，具有很强的形态学特性，能够有效地提取和分离图像形状和几何结构信息。

5.1 膨胀（Dilation）：

对图像进行阈值分割需要用到图像的色彩空间概念。

图像的膨胀可以将图像中具有一定厚度的物体的大小扩大。具体做法是使用一个结构元素对原图像进行扫描，以判断结构元素与原图像中的元素相交时是否需要将结构元素的灰度值进行“膨胀”操作得到输出结果。膨胀算法可以用于连接物体的空隙，填充物体中的小空洞，增加物体的面积，并提取有用信息等应用方向。

5.2 腐蚀（Erosion）：

与膨胀算法不同的是，腐蚀操作可以将图像中具有一定靠近边缘的物体的大小缩小。具体做法是使用一个结构元素对原图像进行扫描，以判断结构元素与原图像中的元素相交时是否需要将输出结果进行“腐蚀”操作得到输出结果。腐蚀算法可以用于分离物体、去除物体中的小噪声点、分离物体中的重叠部分等应用方向。

5.3 开操作（Opening）：

开操作是依次进行腐蚀操作和膨胀操作组合而成的，先对原图像进行腐蚀，再对腐蚀后的结果进

行膨胀运算。开操作可以平滑图像，提取图像中物体边界特征，消除细小的物体并分割连接的物体等。

5.4 闭操作（Closing）：

闭操作是依次进行膨胀操作和腐蚀操作组合而成的，先对原图像进行膨胀，再对膨胀后的结果进行腐蚀运算。闭操作具有平滑图像、拓展物体边界、连接高度靠近的物体、去除较小的空隙等特点。

5.5 黑帽操作（Black-Hat）：

黑帽操作是由原图像和进行开操作后的图像的差值构成，它能够提取出图像中小的、冷门的结构，并对物体进行特征提取、目标检测等任务。黑帽操作可用于物体表面缺陷的检测、腐蚀、干扰和噪声的消除、灰度值变化检测等方面。

5.6 顶帽操作（Top-Hat）：

顶帽操作是由进行闭操作后的图像与原图像之间的差值构成，它可以突出图像中较亮的部分，并对物体进行特征提取和目标检测等任务。顶帽操作可用于“基线消除”、“形状分析”、“直方图处理”、图像的“尺度归一”等方面。

1.5.4.3 算法流程

综合考虑目前的需求，本算法主要用于识别兑矿框并解算位姿以发送给下位机，实现自动兑矿。下面将从获得的图像



图 1.5.4.3-1 算法整体流程图

1. ROI 获取：

为了排除背景元素的干扰，以获得更好的阈值分割效果，我们利用深度信息提取 ROI。根据车长、相机安装位置、兑换站尺寸与兑换框移动范围，得到

$$depth_{max} = L_{car} - L_{camera-car} + L_{station} + L_{box} + z_{max}$$

$$depth_{min} = L_{car} - L_{camera-car} + L_{station} + z_{min}$$

其中 L_{car} 为车长， $L_{camera-car}$ 为相机距离工程车末端的距离， $L_{station}$ 为兑换站前沿距离兑换框前沿的距离， z 为兑换框移动范围， L_{box} 为兑换框宽度。

读取深度图，遍历像素点，当 $depth_{max} \geq depth \geq depth_{min}$ 时，将此像素标为 255，反之标为 0，实现深度图二值化。对二值化后的深度图进行 `getcontours()` 轮廓提取，再利用 `boundingRect()` 获得每个区域的最小外接矩形，对其进行长宽比、面积等约束，在原图中进行裁剪，获得兑换站 ROI。

2. 阈值分割：

将 ROI 图像进行高斯滤波处理后，转化为 HSV 图像或者灰度图像。根据要识别的灯条的颜色特征调整要分割的阈值范围，以达到将兑矿框的灯条在二值化图像中现实出来的效果。目前为了应付不同的光线环境，准备了多种阈值分割方案，包括 GRAY（灰度图阈值分割），HSV（hsv 阈值分割），ADAPT（自适应阈值分割）可以根据适当的场景进行选取。我们默认采用自适应阈值分割，步骤如下：

1. 将图像分成若干个小区域：首先将原始图像分成若干个大小相同的小区域，每个小区域都包含了一定数量的像素。

2. 计算每个小区域的阈值：对于每个小区域，计算一个局部阈值来进行分割。在基于平均值的自适应阈值分割中，通常采用每个小区域内像素灰度值的平均值作为阈值；在基于高斯加权平均值的自适应阈值分割中，通常采用每个小区域内像素的加权平均值作为阈值。在计算每个小区域的阈值时，需要考虑到小区域的大小、像素灰度分布等因素。

3. 对每个小区域进行二值化：根据每个小区域的阈值，将该小区域内的像素分为两类，即前景和背景。一般情况下，我们将小于阈值的像素标记为背景，将大于阈值的像素标记为前景。

4. 合并小区域：将每个小区域的二值化结果合并起来，形成最终的二值化图像。此时，我们就可以通过对二值化图像进行形态学处理等操作，从而得到所需的图像分割结果。

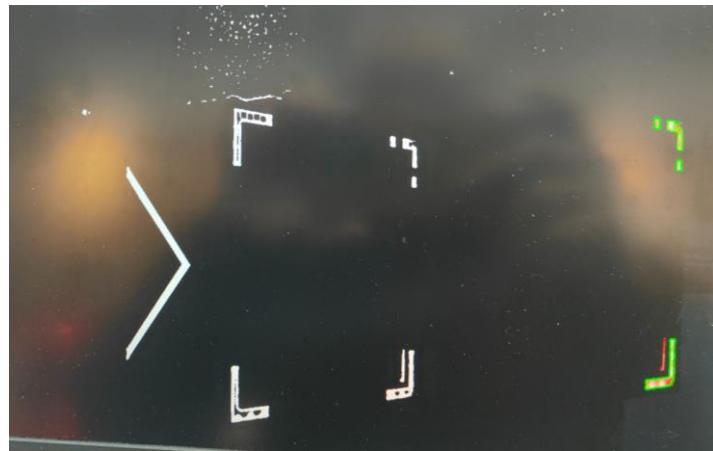


图 1.5.4.3-2 代码识别展示图

3. 轮廓提取：

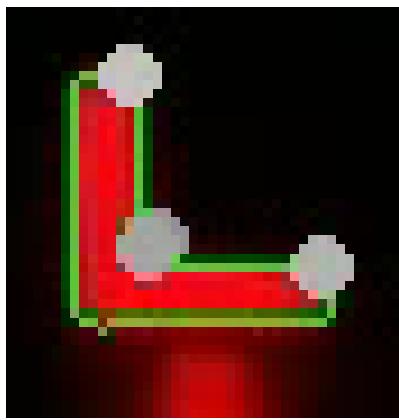
根据已经获得的二值化图像提取轮廓，将所有具有父轮廓的轮廓筛除，并根据轮廓的 minrotatedrect 的长宽比例以及轮廓的面积等特性判断轮廓是否是兑矿站的灯条的轮廓，将轮廓提取出来后，根据轮廓的质心于最小外接矩形的中心的位置关系判断灯条的方向（灯条呈直角，直角的朝向为其方向），因为二值化图像可能存在锯齿，通过多边形拟合使轮廓进行平滑化。

4. 获取特征点：

为了提升传统视觉的鲁棒性，特征点提取方式需要将多个轮廓分开讨论。

目前已有的方案为：通过提取凸包并与原图像做异或操作，提取出直角灯条轮廓的内嵌三角形。并且对此三角形做多边形拟合操作，获取三角形的三个点。

之所以对三角形做多边形拟合操作而不是直接对直角灯条做拟合操作的原因是，直角灯条的形状为凹六边形，形状比较复杂，且在某些情况下边缘几个像素点的差别容易导致拟合不准确。而三角形形状比较简单，拟合时，参数可以大胆调整，且不容易出现拟合失败的情况。下图中，三个用灰色点标出的点，就是拟合的三角形的三个角点。



为了保证后续 pnp 解算，需要明确清楚三角形拟合时，三个角点的顺序。通过观察上图可以发现：有两个角点占据边缘位置，一个角点占据中间位置，而轮廓点的排序为逆时针排序，因此只需要找出占据中间位置的角点即可，可以通过卷积，计算角点周围灯条所占面积找出正确的角点。

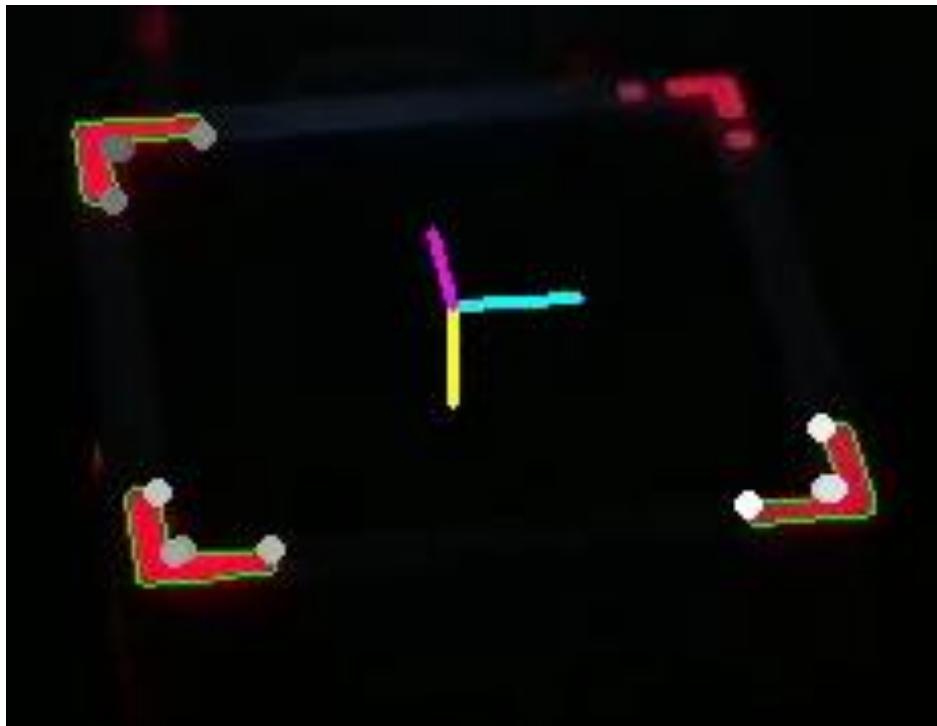
通过此方法后，在实际上我们也确定了灯条轮廓的方向，之后可以通过不同灯条之间的几何位置关系来对灯条的之间的顺序做进一步判断，以达到获取多个灯条之间的特征点的顺序关系。并且将不同灯条分开讨论的方法避免了出现遮挡识别就会失效的情况，充分提高了识别的鲁棒性。

5.位姿解算：

5.1 PnP 算法：

使用 OpenCV 自带的 solvePnP 对识别到的特征点进行位姿解算，估计出兑换框的平移矩阵和旋转矩阵。solvePnP 在得到的特征点比较多的时候，精度也会比较高，因此我们选择利用尽可能多的特征点来对兑换框进行识别。

前面提到，轮廓的方向已经确定，并且多个轮廓之间的位置关系可以通过几何关系判断，因此多个轮廓之间的顺序关系也可以确定，分别对不同的灯条进行编号则可以通过准确的判断将轮廓排入正确的序号中，再将轮廓中的特征点与理论上的特征点在空间中的理论位置坐标根据序号一一对应，则可以实现多个特征点数量可变的 pnp 解算。



如上图可以看见，右上角的灯条因为阈值分割的原因没有被识别到，但是通过对其它灯条之间顺序的正确判断，也成功解算出了兑换矿的几何坐标。

5.2 深度解算：

PNP 问题本身是指从相机的一张二维图像中，利用三维世界坐标系中的已知点和它们在图像中的对应点，计算出相机在三维空间中的姿态（位置和朝向）的问题。然而，当所提供的点数量少于 6 个时，PNP 问题可能存在多解问题，即存在多个相机姿态能够满足已知点和对应的图像点的条件。多解问题的出现是由于在 PNP 问题中，已知的点和它们在图像中的对应点只提供了有限的信息，无法准确地描述相机的全部运动。

除此之外，PnP 算法依赖三个及三个以上的精准点。但由于兑换框姿态变换导致的环境变化，以及阈值分割本身的局限性，对三个及三个以上的精准点的苛求较难实现。所以我们引入深度图中的深度信息。以深度图+一个精准点（在兑换框姿态变动的范围内，能始终有一个特征角保持较为明显特性），即可解算出兑换框的姿态。

5.2.1 坐标系变换：

设相机的内参矩阵为 K ，世界坐标系下的三维点为 P_w ，相机坐标系下的三维点为 P_c ，相机的外参矩阵为 R 和 t ，则有：

$$P_c = R * P_w + t$$

$$K = \begin{vmatrix} fx & 0 & cx \\ 0 & fy & cy \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} 0 & fy & cy \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

其中，R 是旋转矩阵，t 是平移向量。Pc 的齐次坐标表示为 $[xc, yc, zc, 1]$ ，Pw 的齐次坐标表示为 $[xw, yw, zw, 1]$ 。则有：

$$\begin{aligned} |xc| & |fx \ 0 \ cx \ 0| |xw| \\ |yc| &= |0 \ fy \ cy \ 0| * |yw| \\ |zc| & |0 \ 0 \ 1 \ 0| |zw| \\ |1| & |0 \ 0 \ 0 \ 1| |1| \end{aligned}$$

化简可得：

$$\begin{aligned} xc &= (xw * fx + cx * zw) / zw \\ yc &= (yw * fy + cy * zw) / zw \\ zc &= zw \end{aligned}$$

5.2.2 求旋转矩阵：

假设有三个共面点 $P_1 = (x_1, y_1, z_1)$, $P_2 = (x_2, y_2, z_2)$, $P_3 = (x_3, y_3, z_3)$, 需要解算出它们所在平面的法向量 $\vec{n} = (a, b, c)$ 。

由“轮廓提取”步骤可得四个特征角区域，在这四个区域随机选择三个区域各取一点，由于这三个点共面，因此法向量垂直于它们所在平面，可以求出法向量与平面上任意两个向量的叉积。我们可以选择向量 P_1P_2 和向量 P_1P_3 来计算法向量。

首先我们需求求出向量 P_1P_2 和向量 P_1P_3 ：

$$\begin{aligned} \vec{v}_1 &= (x_2 - x_1 \ y_2 - y_1 \ z_2 - z_1) \\ \vec{v}_2 &= (x_3 - x_1 \ y_3 - y_1 \ z_3 - z_1) \end{aligned}$$

然后求出向量 $\vec{n} = (a, b, c)$ 的分量，即：

$$a = \vec{v}_1_y \vec{v}_2_z - \vec{v}_1_z \vec{v}_2_y$$

$$b = \vec{v}_1_z \vec{v}_2_x - \vec{v}_1_x \vec{v}_2_z$$

$$c = \vec{v}_1_x \vec{v}_2_y - \vec{v}_1_y \vec{v}_2_x$$

最后，我们将法向量单位化：

$$\vec{n} = \frac{(a \ b \ c)}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}$$

就可以得到平面的法向量。根据法向量即可解得欧拉角。

5.2.3 求平移向量：

由“获取特征点步骤”可得原定为 PnP 解算提供的四个特征点，根据区域面积大小与深度信息，筛选出相邻区域的准确度最高的一个特征点。

$$Point_{real} = (x_1, y_1, z_1)$$

$$Point_{object} = (x_2, y_2, z_2)$$

其中 $Point_{real}$ 为该点在世界坐标系下的坐标， $Point_{object}$ 为该点在物体坐标系下的坐标。根据公式：

$$\overrightarrow{Move} = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1)$$

可求得平移向量。

1.5.4.4 夹矿部分

综合考虑目前的需求，本算法主要用于识别矿石并解算位姿以发送给下位机，实现自动夹矿。

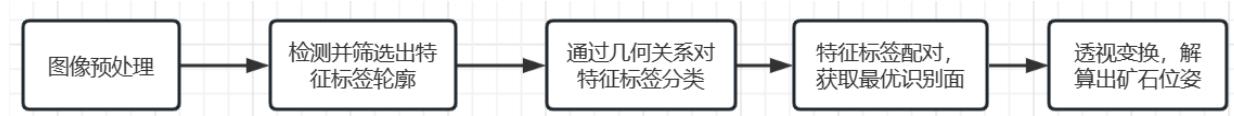


图 1.5.4.4-1 夹矿算法整体流程图

首先对原始图像进行预处理，包括二值化和滤波。

接下来，程序会查找四角标签，即在二值化的图像中通过轮廓查找算法找到符合条件的轮廓，并判断该轮廓是否为一个四边形标签。如果该轮廓符合要求，程序会求出该轮廓的质心坐标，然后对该轮廓进行特征标签分类，判断该标签是方形特征还是直角特征，并获取直角特征的朝向。最后，程序通过对特征点的筛选，找到最合适的四点组合，实现透视变换，以便最终得到俯视图像。其中特征匹配流程如下：

1. 首先调用 `cv.findContours()` 函数，对输入的二值图像进行轮廓提取，返回轮廓数组(`contours`)和层级信息(`hierarchy`)。
2. 根据提取到的轮廓数组(`contours`)，计算最小包围矩形，获取矩形的四个顶点坐标，并计算矩形的面积。
3. 根据最小包围矩形的面积与轮廓的面积的比值，判断是方形特征还是直角特征。比值小于 1.5 时，认为是方形特征，大于等于 1.5 时，认为是直角特征。

4.如果是方形特征，直接返回方向为"rect"，表示该特征是一个矩形。

5.如果是直角特征，根据最小包围矩形的四个顶点坐标，计算特征图案的中心坐标和质点坐标，并在原图上绘制对应的标记点。然后根据中心坐标和质点坐标的相对位置，判断特征图案的方向，返回对应的方向字符串，表示特征图案的位置。

代码中还包含了一些绘制图像的函数调用，用于在原图像上绘制轮廓和标记点，方便调试和可视化，效果如下：

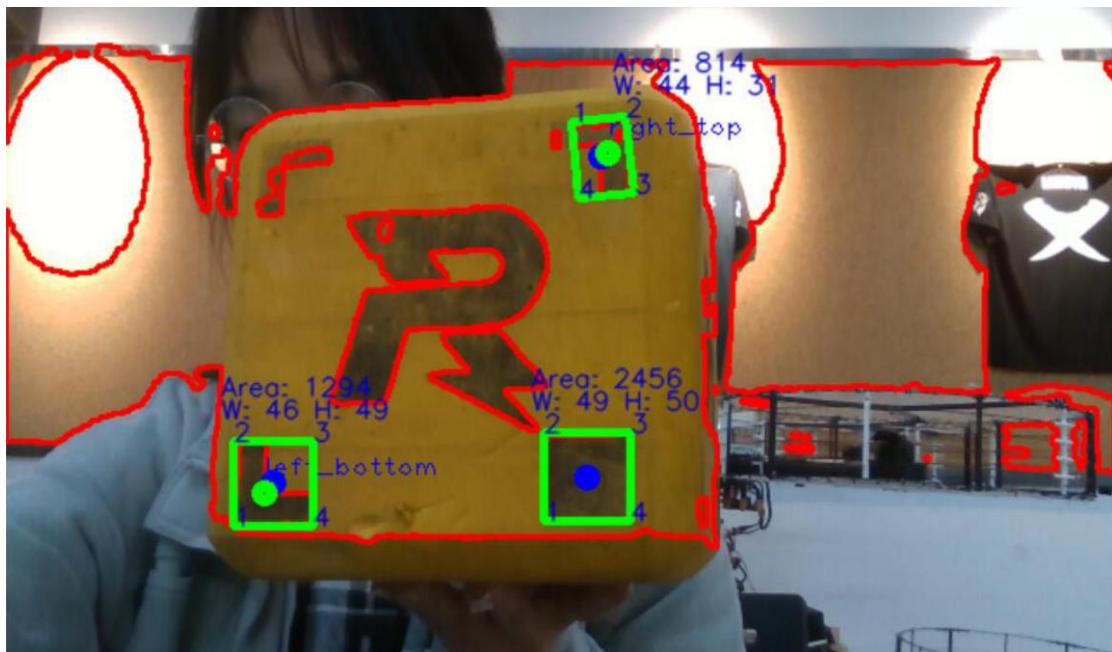
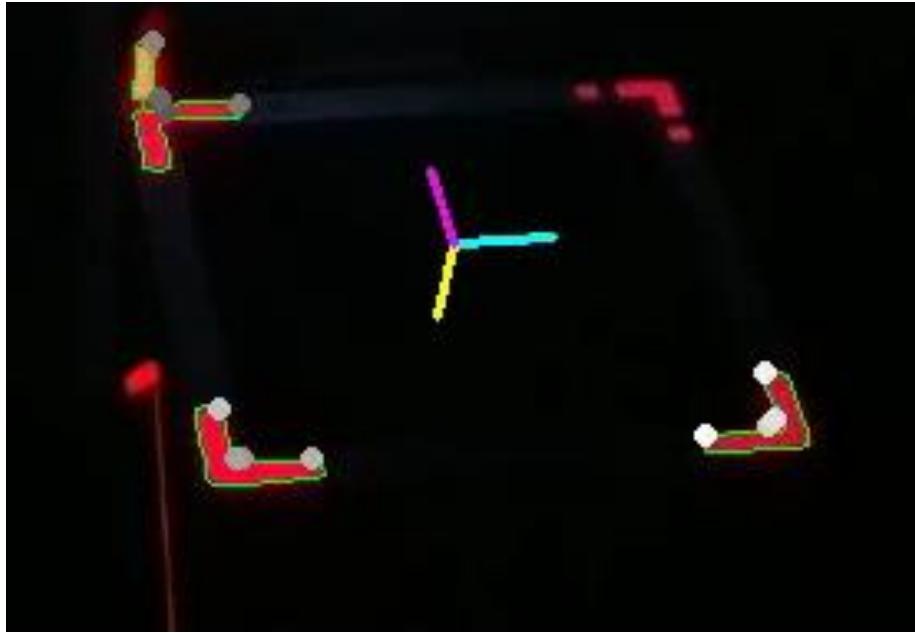


图 1.5.4.4-2 夹矿算法识别效果图

1.5.4.5 后续优化

传统视觉不够鲁棒的问题通过改变识别算法得到了一定解决，在测试时遇到的实际问题是：在兑换框的后方机械臂上的灯条和兑换框上方的特征灯条重合的时候，容易出现误识别的情况。具体如图：



可见，对于左上角的灯条识别出现了误识别的情况，这是由于后方灯条和兑换框上的灯条重合之后，阈值分割有时不能完全将两者分开，分割后的形状又与形状为直角的其它灯条相近，在进行逻辑判断的时候，容易将重合部分误判为一个直角形状的灯条。

事实上，灯条的直角形状特征也比较容易因为阈值分割的不完善而出现的噪点被误判。

对于这种情况，如果采用将四个完整灯条全部识别成功才会进行位姿结算则不会出现类似误判情况，但是这种做法会导致当四个角的其中之一被遮挡，或者五级兑矿偏转角度比较大的时候，视觉失去作用，且降低识别的鲁棒性。

为解决这一误识别的情况，我考虑了升级轮廓识别之后的形状判断方案，希望可以做到：不同灯条同时出现可以用来增强整体判断的准确性，单同时，并不要求所有灯条同时出现。

具体的解决方案则是，对于每一个分割的轮廓增加权值，当不同的直角轮廓出现，并且符合兑换框上的直角灯条的理论位置时，将轮廓的权值增大，并设定一个阈值，只有轮廓的权值超过对应的阈值时，才会将该轮廓的特征点提取出来，放入下一个步骤。而这一阈值，经过实际测试，设定为根据不同轮廓的出现数量自行调整比较合理。

而 pnp 解算的步骤中，具体几点解算也是根据获取的特征点数量和类型动态调整，为了保证解算精度，设定为至少正面出现了两个以上的轮廓后者出现了侧面灯条的轮廓才会进行 pnp 解算。

后续增强视觉识别的效果可以采用深度学习进行直接回归。进行研究后，决定采用 densefusion。既可以回归矿石姿态，也可以回归兑换框姿态。

Densefusion 是基于 RGB-D 图像预测目标物体位姿的方法。首先，利用一个语义分割网络得到目标物体的分割图像，分别用两个网络用于处理 RGB 图像和点云图（由深度图获得），将颜色特征和几何特征逐像素的拼接起来，并利用一个特征融合网络获得全局特征。然后将全局特征级联到每个像素的特征向量上，并利用位姿预测网络输出每个像素点对应的位姿估计结果和一个置信度值，最终选择置信度最大的像素点。

对应的位姿估计结果。本文在此基础上还提出了一种基于深度学习的迭代优化方法，能够在上一次位姿估计的基础上，不断优化位姿估计的结果。架构如下：

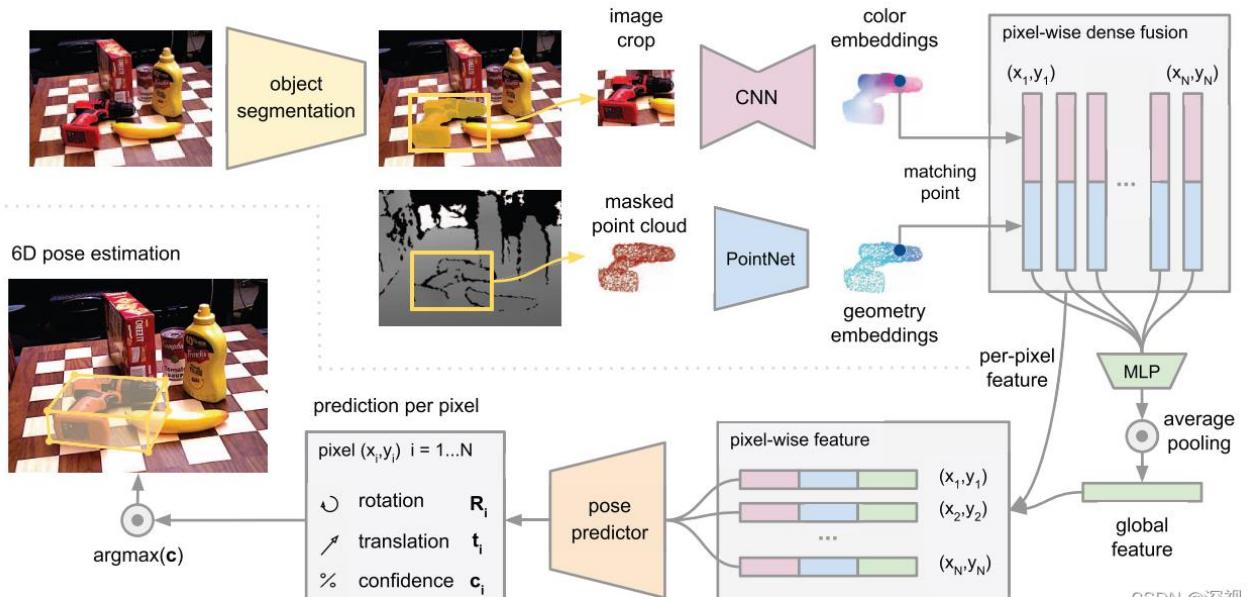


图 1.5.4.5-1 densefusion 架构

数据集采用 linemod 格式，在数据集的制作中，为获得 6-dof 值，我们使用多 apriltag 解算兑换框姿态，如下：

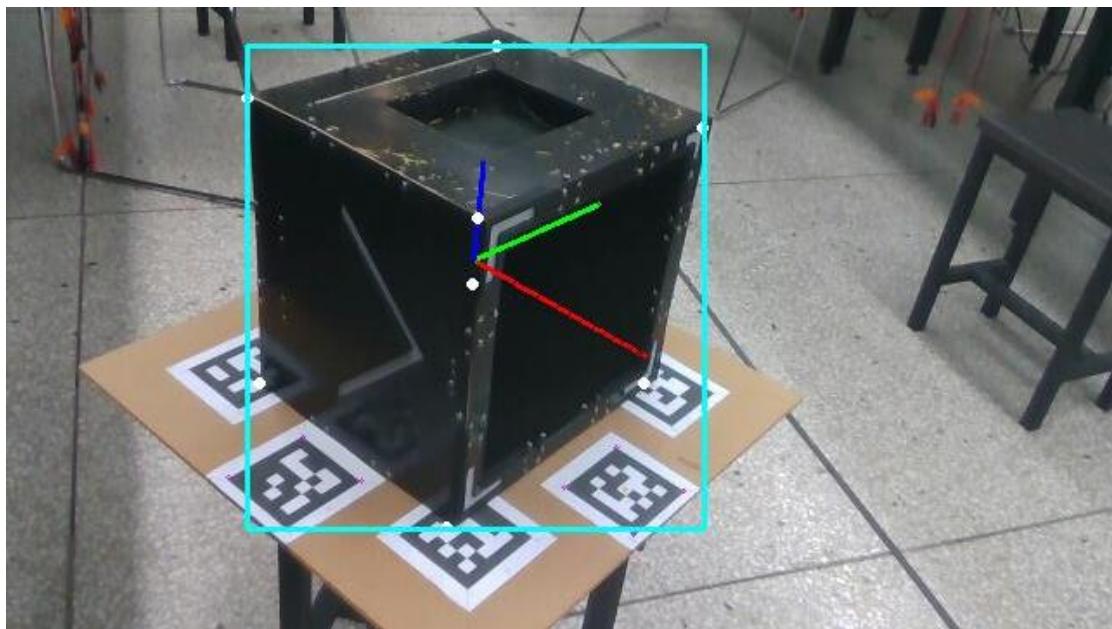


图 1.5.4.5-2 数据集制作中兑换框姿态 6-dof 获取

目前深度学习方法还没有实装，仍在研发中。

1.5.5 其它

1.5.5.1 兑换站

整体框架:

由于新赛季工程兑换规则的更改，我们亟待一个可以模拟官方兑换站不同难度的自制兑换站。于是我们采用了成品机械臂加自研控制组成我们的自制兑换站。



图 1.5.5.1-1 成品机械臂示意图

兑换站主要用于在满足当前规则下工程机器人的兑换测试需求。本系统一共可以分为三个层次，包括 1) 控制兑换框的灯条灯光，2) 根据兑换难度进行机械臂的末端位姿控制，3) 通过蓝牙模块发出当前机械臂末端的位姿。整个兑换站由六自由度机械臂和兑换框构成，机械臂可以实现六自由度的运动，可以实现不同兑换难度下的随机位置运动；兑换框能够模拟比赛中的真实兑换框的灯光效果，用于进行视觉识别的测试；通过蓝牙模块向工程机器人发送当前的兑换站状态，便于在调试过程中测试矿石兑换算法的正确性和准确性，快速定位兑换失败的问题等。

运行流程:

兑换站的主控制器上有两个按键，可以分别用来设置兑换难度和控制机械臂运动，设置完兑换难度后，根据随机生成的末端位置和欧拉角，计算出对应的姿态矩阵，逆运动学解算得出 6 个轴步进电机的角度，再控制电机转到相应角度。同时，可以使用蓝牙模块通过串口直接控制兑换站的兑换难度和运动。在兑换站运动到指定位置后，工程机器人开始通过视觉算法对兑换框的位姿进行识别，然后进行矿石的兑换。同时，兑换站会向工程机器人发送当前的兑换框位姿，该位姿仅用于判断视觉识别的准确性，不用于控制工

程机器人进行兑换。

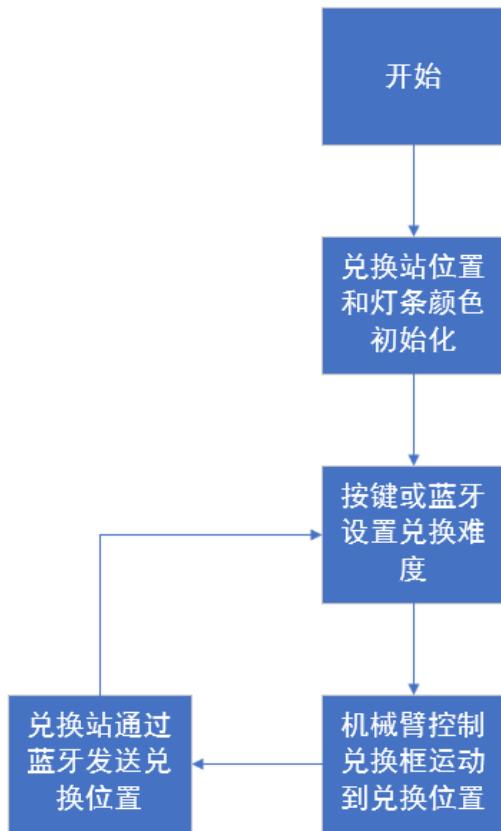


图 1.5.5.1-2 兑换站流程图

重点功能:

在今年的 RMUC 比赛规则中，兑换站从一个在世界坐标系下不发生位置偏移的框，变为一个由 6 轴机械臂控制的，会相对于世界坐标系发生平移与旋转偏移的框。为了能够成功实现不同难度等级的矿石兑换，工程机器人必须要能够实现多自由度的矿石兑换和精准的位姿识别。六自由度兑换站的研发，能够让兑换框按照设想的位置运动，模拟真实比赛中兑换站的运动情况，极大地便利了视觉识别算法和工程机器人兑换的调试过程。同时，在研发过程中得出的六自由度机械臂逆运动学解算算法，也可以复用于工程机器人中对于机械臂逆运动学解算流程。

软件测试:

整个机械臂的控制算法和兑换站的兑换逻辑首先在仿真软件 coppelasim 中完成开发，由于机械臂末端的位姿可以直接由软件给出，我们在该软件中已验证逆运动学解算算法和兑换站在不同兑换难度下的兑换逻辑的正确性，然后在 STM32 微控制器上实现对于步进电机位置的平滑控制，再将仿真软件中的算法移植到 STM32，成功实现了该兑换站的主要功能。

1.5.5.2 上位机

上位机是指与下位机进行通讯的计算机，通常是一个 PC 机或者一个嵌入式计算机，它的作用是对下

位机进行监控、控制和数据处理。下位机通常是一些嵌入式系统，比如单片机、嵌入式控制器、PLC 等，它们负责完成实际的物理控制和数据采集任务。

上位机主要的作用包括：

- 监控下位机状态：上位机可以通过与下位机通信，实时获取下位机的状态信息，如传感器的读数、执行器的状态等。
- 数据处理与分析：上位机可以对下位机采集的数据进行处理和分析，如对实验数据进行曲线拟合、数据统计分析等。

由于再嵌软实际调车过程中，有很多情况都需要实时知道各种参数的值并且很有可能随时会疯掉，所以如果再疯掉的过程中知道哪些参数有问题，会很快解决问题并且减少不必要的机械电路损耗。同时还可以进行数据可视化，减少 debug 时间。

实现方式：

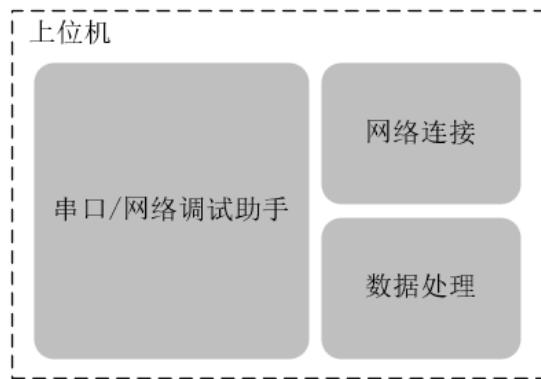


图 1.5.5.2-1 上位机逻辑示意图

本上位机使用 QT 进行开发，开发语言是 C++。

上位机协议：

接收协议：

上位机的串口发送类似于 TCP 报文段的形式，由帧头，数据部分，帧尾三部分组成。其中帧头和帧尾主要用来进行帧定界和数据校验和分类。

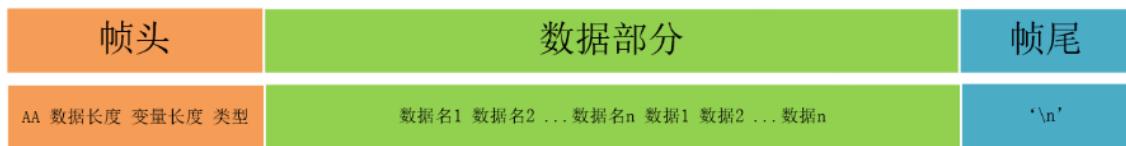


图 1.5.5.2-2 上位机通信协议帧示意图

其中帧头的 AA 是判定该帧为有效帧，如果上位机收到后允许进入到数据处理阶段，如果没有收到，丢弃该帧，直到下一个 AA 出现，数据长度为数据部分的总长度，例如由 m 个变量名和变量值，数据长度的值应该为 2m，变量长度为 m，如果数据长度和变量长度不一致，该帧也将被丢弃。类型为不同兵种的断线检测，小发反馈数据等。具体数值由下表展示：

表 1.5.5.2-1 不同兵种标志位对应表

类型	值
小发	000
步兵	001
英雄	010
哨兵	011
工程	100

数据部分的组成格式为先罗列所有的变量名，再一一把对应的变量值传递过来。变量值最大不应该超过 65535，超过则会报错，且数量不宜超过 20 个。在断线检测中，数值超过 100 将被判定为离线，对应的区域将被置为红色，反之则为绿色。

帧尾必须要有回车符来确定这一帧已经发送完毕，否则上位机会一直处于等待接受消息的状态。数据发送的时间间隔不宜过大，目前上位机没有设置超时功能，如后续遇到问题可能会更改。但是数据发送越

快，取样频率越高，越能正确发现问题。

效果展示：



图 1.5.5.2-3 上位机各个区域示意图

上位机主界面主要分为 5 个部分，分别是功能选择区，参数设定区，信息接收区，表格绘图区以及调节摩擦轮区域。其中功能选择可以选择有线串口或者无线网络进行信息的收发，参数设定区主要选择串口或者 TCP 协议地参数设定，信息接受区可以用 ASCII 或者 HEX 形式看到所接受的数据。如果接受的数据按照通信协议发送，则可以在表格绘图区实时监视相应的数据，双击会打开绘图界面更加直观的看到数据的变化。

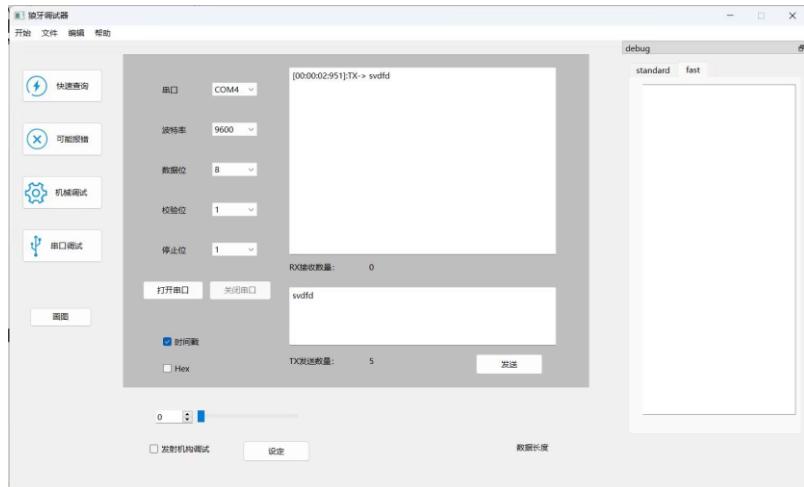


图 1.5.5.2-3 上位机串口发送示意图

部分代码展示：

```
timer = new QTimer;
```

```
connect(timer,&QTimer::timeout,[&](){
    portStringListLast.clear();
    foreach(const QSerialPortInfo &info,
QSerialPortInfo::availablePorts()) //扫描可用串口
        portStringListLast += info.portName();

    foreach(const QSerialPortInfo &info,
QSerialPortInfo::availablePorts()) //扫描可用串口
        if(portStringList.length() <
info.availablePorts().length()||portStringList.length() >
info.availablePorts().length())
    {
        qDebug()<<"portStringList.length:"<
```

图 1.5.5.2-4 串口热插拔代码

1.5.5.3 自定义控制器

设计方案：

自定义控制器的本质其实是三个编码器组成的三轴机械臂，通过发送位置的变化实现控制工程机器人上机械臂的末端三轴。自定义控制器的机械结构与机械臂末端三轴保持一致，使得操作手可以更加直观地对机械臂进行控制。本系统一共可以分为三个层次，包括自定义控制器的数据读取，对原始数据的处理和数据帧的打包发送。

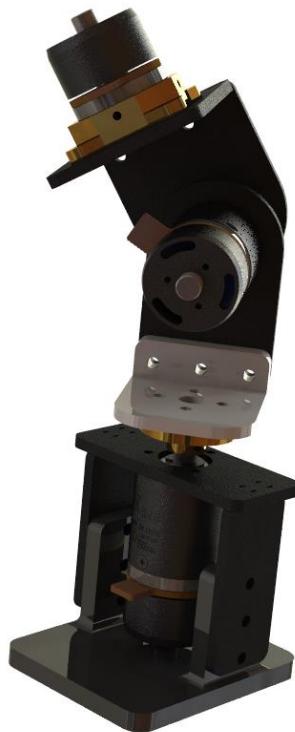


图 1.5.5.3-1 自定义控制器机械示意图

运行流程：

自定义控制器上电时记录当前的各电机姿态，视为默认位置，通过读取 3 个电机的角度，判断当前的自定义控制器状态，将读取到的位置，速度等数据滤波之后，打包成特定的数据帧，通过串口发送给客户端，工程机器人从裁判系统数据帧中获取当前的自定义控制器状态，并控制机械臂转到指定的角度。

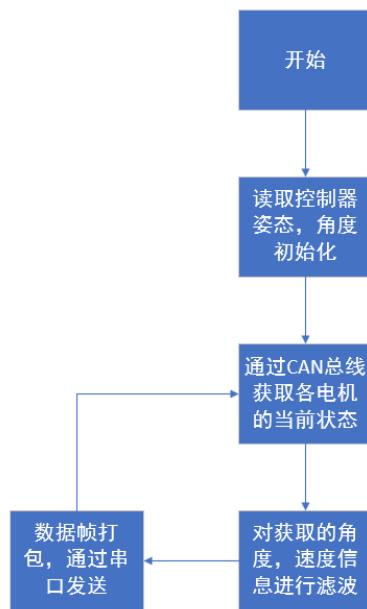


图 1.5.5.3-2 自定义控制器流程图

重点功能:

由于工程机器人上使用了机械臂，包括键盘，鼠标，遥控器在内的传统的控制方式很难对机械臂末端进行灵活的控制，而视觉识别方案难免会存在一定的误差，可能导致矿石兑换的成功率不高。由于有着和机械臂类似的机械结构，自定义控制器可以让操作手更便捷地独立控制工程机器人进行取矿，兑换矿石等操作。

低通滤波的引入，可以极大地缓解人手在操作时的数据抖动，让机械臂的运动更加流畅，平滑。

软件测试:

将自定义控制器发出的数据帧发送至电脑，通过 VOFA 软件捕获串口数据，绘制出数据帧中三轴角度随时间变化的曲线图。如下图所，自定义控制器法术的数据包中正确的包含了三个轴的当前角度，同时，经过低通滤波后，角度的变化也更加平滑。

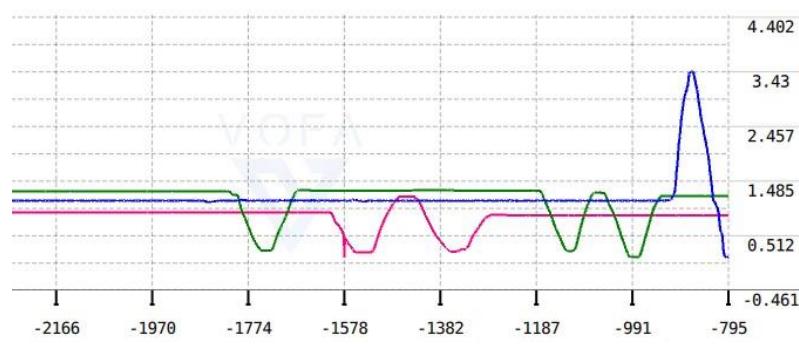


图 1.5.5.3-2 自定义控制器拟合曲线

1.6 研发迭代过程

1.6.1 研发迭代记录

表 1.6.1-1 工程车研发迭代记录

机械	电控	视觉
1. 底盘优化—1/2 周 2. 上层建模—1/3 周	1. 调试单轴陀螺仪—1/2 周 2. 底盘布线—1/1 周	1. 学习视觉开源部分—1/2 周
1. 底盘优化—2/2 周 2. 上层建模—2/3 周	1. 调试单轴陀螺仪—2/2 周 2. 测试并优化空接所用的传感器—1/2 周 3. 确定电机选择的型号和数量—1/2 周 4. 确定主控硬件资源分配方案—1/2 周	1. 学习视觉开源部分—1/2 周
1. 上层建模—3/3 周 2. 整车建模合装配体—1/1 周	1. 测试并优化空接所用的传感器—2/2 周 2. 确定电机选择的型号和数量—2/2 周 3. 确定主控硬件资源分配方案—1/2 周	1. 针对性学习 PNP 解算视觉—1/2 周
1. 制作购买相关部件—1/2 周	1. 上层主控板绘制—1/3 周	1. 优化 PNP 解算视觉—1/2 周
1. 制作购买相关部件—2/2 周	1. 学习 PNP 解算视觉—2/2 周 2. 上层主控板绘制并测试—2/3 周	2. 优化 PNP 解算视觉—2/2 周
1. 整车装配—1/3 周	1. 模型仿真—1/2 周 2. 上层主控板绘制并测试—3/3 周	1. 测试灯光影响下视觉对位数据—1/3 周

机械	电控	视觉
1. 整车装配—2/3 周	1. 模型仿真—2/2 周 2. 上层机构布线—1/2 周	1. 测试灯光影响下视觉对位数据—2/3 周
1. 整车装配—3/3 周	1. 整车代码编写—1/2 周 2. 上层机构布线—2/2 周	1. 测试灯光影响下视觉对位数据—3/3 周
1. 整车测试调整—1/2 周	1. 整车代码编写—2/2 周 2. 第一版车整车调试—1/2 周	1. 调试对位视觉部分—1/2 周
1. 整车测试调整—2/2 周	1. 第一版车整车调试—2/2 周	2. 调试对位视觉部分—1/2 周
1. 设计新一版的上层平移方案工程车—1/3 周 2. 设计备选取矿方案—1/2 周	1. 代码优化方案—1/2 周 2. 电机选型方案优化—1/2 周 3. 电路系统优化方案—1/2 周	1. 尝试深度相机识别定位—1/3 周
1. 设计新一版的上层平移方案工程车—2/3 周 2. 设计备选取矿方案—2/2 周	1. 代码优化方案—2/2 周 2. 新传感器选择—1/1 周 3. 电机选型方案优化—2/2 周 4. 电路系统优化方案—2/2 周	1. 尝试深度相机识别定位—2/3 周
1. 设计新一版的上层平移方案工程车—3/3 周 2. 购买需要的零件及加工件—1/1 周	1. 购买并调试新传感器—1/1 周 2. 新版主控设计—1/2 周	1. 尝试深度相机识别定位—3/3 周
1. 第二版工程车装配—1/2 周	1. 新工程车的仿真—1/2 周 2. 整车代码编写—1/3 周 3. 新版主控设计—2/2 周	1. 复杂灯光下的识别测试—1/3 周
1. 第二版工程车装配—2/2 周	1. 新工程车的仿真—2/2 周 2. 整车代码编写—2/3 周 3. 整车电路系统装配—1/2 周	1. 复杂灯光下的识别测试—2/3 周
1. 辅助电路布线—1/1 周	1. 整车代码编写—3/3 周 2. 整车电路系统装配—2/2 周	1. 复杂灯光下的识别测试—3/3 周

机械	电控	视觉
1. 与第一版车高强度测试比较并且优化—1/2 周	1. 整车调试—1/4 周	1. 视觉实战测试与调整—1/4 周
1. 与第一版车高强度测试比较并且优化—2/2 周	1. 整车调试—2/4 周	1. 视觉实战测试与调整—2/4 周
1. 替换极少部分机构—1/1 周 2. 更换工程车部分板材—1/2 周	1. 整车调试—3/4 周	1. 视觉实战测试与调整—3/4 周
1. 配合嵌软调车—1/1 周 2. 更换工程车部分板材—2/2 周	1. 整车调试—4/4 周	1. 视觉实战测试与调整—4/4 周

1.6.2 测试记录

1. 测试项目一：

测试名称：老工程全部上场功能

测试时间：2022.12.9

测试功能：底盘移动、大小资源岛、救援、兑换

测试地点：场地

测试办法：模拟工程单项赛规则，进行空接，大小资源岛取矿及兑换，救援步兵英雄到指定地点

测试人员：吴垂云、刘旭东、李宜桐

2. 测试项目二：

测试名称：新工程机械电路部分

测试时间：2023.03.15

测试功能：底盘移动、自动取矿、自动兑换、地矿

测试地点：场地

测试人员：刘旭东 李宜桐 吴垂云/王世康 柳清星

3. 测试结果:

测试项目一:

问题: 空接概率很低，前移不流畅

解决办法: 更换吸盘，增加前移刚性连接

总结: 整体功能较完整，基本可以完成所有任务，但是还存在问题，整体稳定性较差。有较大改进空间。

测试项目二:

问题: 前移时由于增加了机械臂重量，前倾较为严重，不符合我们前移倾角小于 2 度的要求，自动兑换解算有误。

解决办法: 更换前轮悬挂，保证底盘稳定，增加恒力弹簧，保证上层稳定性。修改坐标系解算代码。

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	完成第一版车的所有硬件、软件	2022.12.9
V1.1	修改电路逻辑，更换吸盘	2023.2.12
V1.2	增加防护，修改机械臂电路，增加前移刚性固定	2023.3.23
V2.0	完成第二版车的所有硬件、软件	2023.3.29
V2.1	修改悬挂问题，更换单目相机	2023.4.5
V2.2	增加稳定气缸，增加滑环	2023.4.9

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	解决人员
				号或阶段	
1	空接成功率很低，兑换角度受限	吸盘没有缓冲并且长度过长，	更换有弹簧 1 型吸盘	V1.1	机械工程师: 刘旭东

2	使用自定义控制器时只能控制三个 joint	没有专门的手动控制状态控制 3 个 link	增加键鼠模式下的状态	V2.0	嵌软工程师：吴垂云 嵌软工程师：王世康
3	前移车有前倾趋势	前轮悬挂较软，没有安装恒力弹簧	更换前轮悬挂，增加恒力弹簧	V2.1	机械工程师：王超
4	兑换坐标回传有误	坐标系解析错误	修改坐标系转换代码	V2.1	算法工程师：卢诗齐
5	机械臂电调自启动	布线问题以及机械臂限位	更换滑环，优化布线	V2.2	机械工程师：刘旭东

1.7 团队成员贡献

姓名	基本信息 (专业、年级、队内角色)	主要负责工作内容描述	贡献度 (所有成员贡献度合计为 100%)
吴培诚	电子信息与通信学院、大三、项目组组长	负责任务分配，进度跟进，解决各个方面所遇到的问题	9%
刘旭东	机械科学与工程学院、大二、工程机械组成员	负责工程上层的机械部分和自定义控制器	13%
王超	机械科学与工程学院、大三、工程机械组成员	负责工程底盘和辅助模块	13%
李宜桐	光学与电子信息学院、大三、工程电路组成员	工程车电路板设计、布线以及维修	13%
吴垂云	未来技术学院、大二、工程嵌软组成员	负责整个过程嵌入式开发，包括取矿逻辑	13%
王世康	电子信息与通信学院、大三、工程组嵌软组成员	负责兑换站机械臂开发，自定义控制器开发	13%
卢诗齐	人工智能与自动化学院、大二、工程视觉组成员	负责视觉兑换及深度学习	13%

姓名	基本信息 (专业、年级、队内角色)	主要负责工作内容描述	贡献度 (所有成员贡献度合计为 100%)
柳清星	计算机科学与技术学院、大二、工程算法组成员	传统视觉(PnP)兑换方案	13%

1.8 参考文献

参考文献	收获点分析
德州仪器高性能模拟器件高校选型指南之电源	学会电源选型知识
德州仪器高性能模拟器件高校选型指南之运算放大器	学会运算放大器选型知识
STM32F10X 硬件开发使用入门	学会单片机硬件开发
硬石电机控制专题指导手册	电机控制的各种方法
Getting started with STM32F4xxxx MCU hardware development	学习单片机硬件部分
https://blog.sina.com.cn/s/blog_5e6f98d40102x7bv.html	MATLAB 机械臂仿真
东大机械开源 (https://blog.csdn.net/huangjunsheng123/article/details/109278122)	学习吸盘结构
https://blog.csdn.net/qq_42727752/article/details/112485460)	机械臂 DH 表示法+正向运动学 机械臂建模+正逆解

1.9 技术方案复盘

1.9.1 赛场性能表现情况分析

本年度的工程车在赛场上较为完整的完成了赛季初的设置任务，具体表现：为地矿，空接，小资源岛等功能正常；兑换任务可以完成四级兑换的全部和五级绝大多数的兑换；在自定义控制器方面，迭代三版的自定义控制器初步实现了想要完成的效果，显著地加快了兑换速度，为复活赛选择五级矿石做好了预备工作；在视觉兑换上克服了兑换站灯条干扰等问题，在四级表现十分稳定，在五级也有较好的发挥；在矿仓发生卡矿情况之下依然可以实现自救；电磁继电器防止撞击和大功率断电……总的来看，这版车在设计上确实完成了赛季初的所有任务，在兑换和取矿上表现了一定的优越性。然而，依然存在很多意料之外的

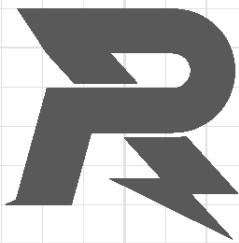
问题：因为机器设计上的小忽视，导致最终取小资源岛的时间大大延长，大资源岛功能无法实现；在矿仓取矿时间过慢；这些劣势使得我们的优势几乎没有体现出来，在完成工程机器人的基本功能表现较为差劲，使得本赛季的工程机器人表现不够好，没有发挥赛季初对于它的期望。

1.9.2 赛场性能表现与规划对比分析

那其实工程机器人的表现不够好确实跟赛季规划有很大的关系，首先是因为疫情原因，工程的第一版车进度过慢，导致了调试时间过少，使得后面几版车非常仓促，在稳定性上表现非常差，甚至出现了一场比赛完全无法运动的情况；其次是方案的选择可能是有些问题，因为成本原因，放弃了一个较为容易且看起来更有优势的控制器方案，选择的方案在表现上不尽如人意；还有就是人力资源的分配上出了一些问题；最后是复活赛的规划，在分区赛工程车暴露出较多问题的前提下，在国赛准备期间未能重视这些问题，并且由于新车的进度堪忧，导致老车不得不带“病”上场，带着比赛前就知道一定会出现的劣势参与复活赛的强烈竞争，最终结果也可想而知。

1.9.3 经验总结

关于经验，就是不要有侥幸心理，发现了问题就要一步一步的解决，不能一了了之，在方案的设计上必须经过细致一些的考虑，准备多种方案来进行保底，然后就是要多准备进行稳定性测试，保证车在较为恶劣的情况下依然有基本功能的实现，最后关于技术方案的制订，我认为一开始就要追求卓越，有较高的追求，这才能在之后的实现中充满动力，不断克服困难。



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