



# Robomaster2019 工程

## 机器人结构设计

**Author:** Davy Hao

# 目 录

第 1 章 绪论.....	- 1 -
1.1 选题的目的和意义.....	- 1 -
1.2 国内外研究现状.....	- 1 -
1.3 设计内容.....	- 3 -
1.4 研究的方法和技术路线.....	- 4 -
第 2 章 总体方案论证与设计.....	- 6 -
2.1 整体方案设计.....	- 6 -
2.1.1 整体结构方案选定.....	- 6 -
2.1.2 整体加工方案选定.....	- 8 -
2.2 系统方案选择.....	- 8 -
2.2.1 行驶系统方案选择.....	- 8 -
2.2.2 升降系统方案选择.....	- 10 -
2.2.3 登岛系统方案选择.....	- 11 -
2.2.4 取弹系统方案选择.....	- 12 -
2.2.5 拖车系统方案选择.....	- 12 -
2.2.6 补弹系统方案选.....	- 12 -
2.2.7 云台方案选择.....	- 12 -
第 3 章 系统结构设计.....	- 13 -
3.1 行驶系统结构设计.....	- 13 -
3.1.1 底盘轮组结构设计.....	- 13 -
3.1.2 底盘车架结构设计.....	- 17 -
3.2 升降系统结构设计.....	- 18 -
3.2.1 升降装置结构设计.....	- 18 -
3.2.2 固定框结构设计.....	- 22 -
3.3.1 定位机构结构设计.....	- 22 -
3.3.2 拉紧机构结构设计.....	- 23 -

3.3.3 承载机构结构设计.....	- 24 -
3.3.4 涵道助推器结构设计.....	- 24 -
3.4 取弹系统结构设计.....	- 25 -
3.2.1 夹取反转机构结构设计.....	- 25 -
3.2.2 伸缩机构结构设计.....	- 26 -
3.4 拖车系统结构设计.....	- 27 -
3.5 补弹系统结构设计.....	- 28 -
3.6 云台结构设计.....	- 28 -
3.7 气动控制系统设计.....	- 29 -
第 4 章 机器人装配与性能测试.....	- 30 -
4.1 机器人装配.....	- 30 -
4.2 机器人性能测试.....	- 30 -
4.2.1 拖车性能测试.....	- 30 -
4.2.2 取弟能性能测试.....	- 31 -
4.2.3 登岛性能测试.....	- 32 -
4.2.4 补弟能性能测试.....	- 32 -
第 5 章 总结.....	- 34 -
参考文献.....	- 35 -
附 录.....	- 36 -
附录 1 工程机器人气动原理图.....	- 36 -
附录 2 工程机器人装配简图.....	- 37 -
致 谢.....	- 38 -

## 第1章 绪论

### 1.1 选题的目的和意义

随着科技的发展机器人越来越多的出现在社会生活中，涉足人类生活的各个领域。从工业生产到家庭生活都能见到机器人的身影，伴随科技发展和对人们对技术的追求，诞生了机器人竞技。最早的机器人竞技比赛是1998英国TNN电视台发起组织的《机器人大擂台》，20年来参赛的机器人选手也由最初的30多部机器人发展到每年有1700多部机器人参赛，比赛的科技含量和激烈程度逐年增加，覆盖了全球27个国家，其中的很多国家也发展了自己的机器人比赛(郭策 and 成慧, 2009)。

全国大学生机器人大赛Robomaster是由共青团中央、全国学联、深圳市人民政府联合主办的机器人竞技赛事，是中国规模最大的机器人竞技大赛，2018年来自海内外超过200支队伍、7000名青年工程师报名参赛，拥有比较广泛的参与度。

在Robomaster 2019赛季中，参赛队伍需自主研发不同种类和功能的机器人，在指定的比赛场地内两队进行战术对抗。每队有五大兵种：步兵机器人、工程机器人、哨兵机器人、英雄机器人，无人机。通过操控机器人发射弹丸攻击敌方机器人和基地。每局比赛7分钟，比赛结束时，基地剩余血量高的一方获得比赛胜利(王旭, 2019)。

其中工程机器人为非战斗机器人，执行登岛、取弹、补充弹药、救援拖车四个主要任务，执行的动作也相对复杂，合理的机械结构对于工程机器人执行动作至关重要。

通过机器人比赛可以培养队员创新能力，锻炼参赛队员开发、设计和团队合作等综合能力，选取工程机器人作为毕业设计的目的在于实践本专业所学知识，解决实际工程问题。

### 1.2 国内外研究现状

机器人比赛从诞生之初就吸引力大量科技爱好者的关注，最早出现的有美国博茨大战，英国机器人大擂台。这类机器人竞技偏向于破坏性和观赏性，是最早将气动知识应用于竞技机器人的比赛，利用压缩气体弥补电动机功率上限短板，短时间释放强大能量，机器人没有复杂机械结构，但在稳定性上要求精益求精。(陈万米, 2010)2007年在美国创办了VEX机器人世界锦标赛(VEX Robotics Competition)，由全球最大的机器人赛事平台RECF(美国机器人教育与竞赛基金会)主办，各种先进科技开始应用于机器人竞技，随着人工智能的发展，利用图像处理、激光雷达等技术让机器人获得了更加强悍的性能，同时机器人的结构也变得更加复杂起来，要求在机械结构设计时配合新的技术，需要传统结构上推陈出新适来应新的控制方法(卿慧玲 and 蔡自兴, 2004)。

中国本土诞生的世界性机器人比赛是Robomaster全国大学生机器人大赛，也是目前全球唯一的射击类机器人竞技比赛，从比赛角度来看目前国内高校工程机器人设计处

于领先水平，工程机器人需要完成登岛，取弹，补弹，拖车四大动作。在 2018 赛季中比较有代表性的是图 1-1 利用抱柱方式进行登岛的东北大学的工程机器人，图 1-2 是利用气动伸缩腿登岛的中国矿业大学机器人。



图 1-1 RoboMaster2018 赛季东北大学工程机器人



图 1-2 RoboMaster2018 赛季中国矿业大学工程机器人

### 1.3 设计内容

根据 Robomaster2019 机甲大师赛规则，全功能工程机器人变形后最大尺寸不得超过  $1200\text{ mm} \times 1200\text{ mm} \times 1200\text{ mm}$ ，变形前尺寸不得超过  $800\text{ mm} \times 800\text{ mm} \times 800\text{ mm}$ 。并可以完成以下四种功能：

1. 可以拖取阵亡步兵机器人和阵亡英雄机器人返回复活点，完成固连和分离操作；
2. 可以利用图 1-3 资源岛 200 mm 台阶或图 1-4 900 mm 登岛立柱完成登岛动作，图 1-5 表达了台阶和登岛立柱在资源岛的相对位置；

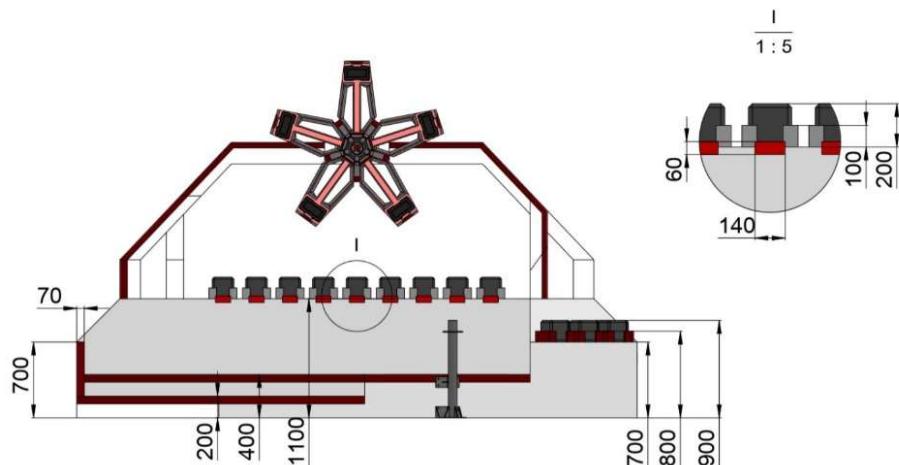
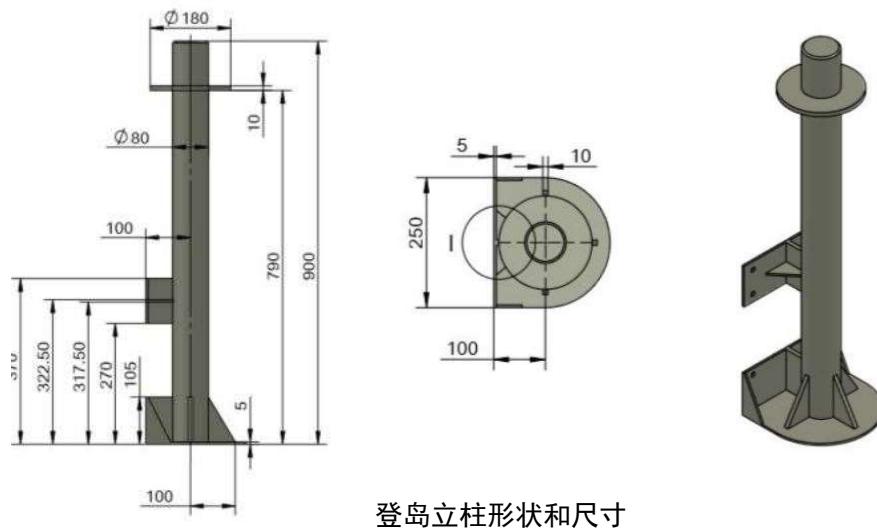


图 1-3 资源岛侧视图



登岛立柱形状和尺寸

3. 能够抓取图 1-3 和 1-6 所展示的资源岛各位置弹药箱，获取弹药箱的的弹丸，弹药箱形状如图 1-5 所示，内部装有一定数量的 42 mm 弹丸

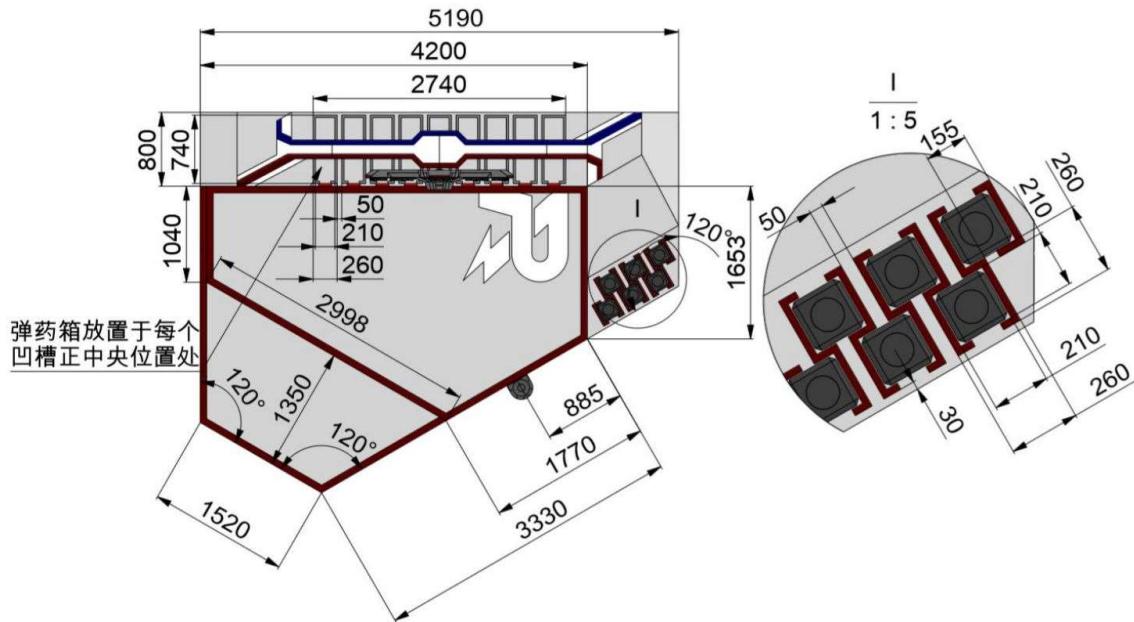


图 1-5 资源岛俯视图

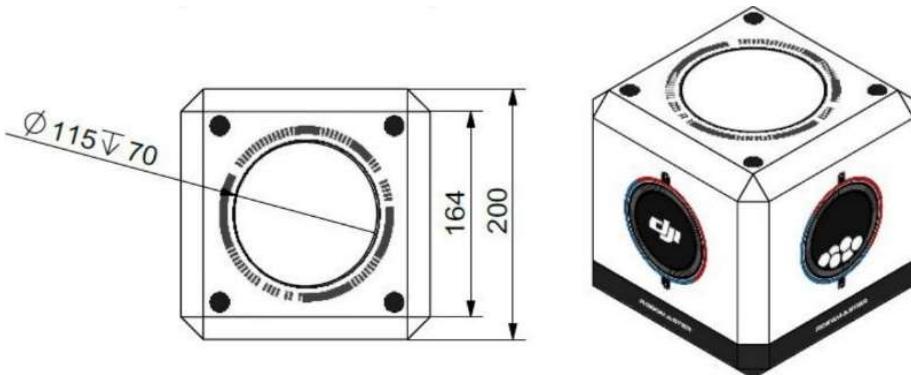


图 1-6 弹药箱尺寸图

4. 可以完成和英雄机器人交互补弹的操作，英雄机器人变形后最大尺寸不得超过  $1200\text{ mm} \times 1200\text{ mm} \times 1200\text{ mm}$ ，变形前尺寸不得超过  $800\text{ mm} \times 800\text{ mm} \times 800\text{ mm}$ 。

#### 1.4 研究的方法和技术路线

工程机器人的设计采用文献研究法数学方法，通过参考成熟机器人设计方法结合数学计算进行工程机器人设计，采用 CAE 和传统设计方法结合技术路线进行机器人设计的快速迭代，在满足功能需要和强度要求的前提下进行结构优化(Dawson et al., 2018)。

图 1-7 反应了技术路线迭代方法，首先通过规则和相关文献制定初步机器人结构方案，确定采购件的选用，然后利用机械设计方法和采购件参数推导出加工件的零件尺寸，之后进行强度校核。再完成局部零件试制和测试，寻找不足，对零件进行修改。这个过程中利用 CAE 技术减少不必要的材料浪费，缩短研发周期。

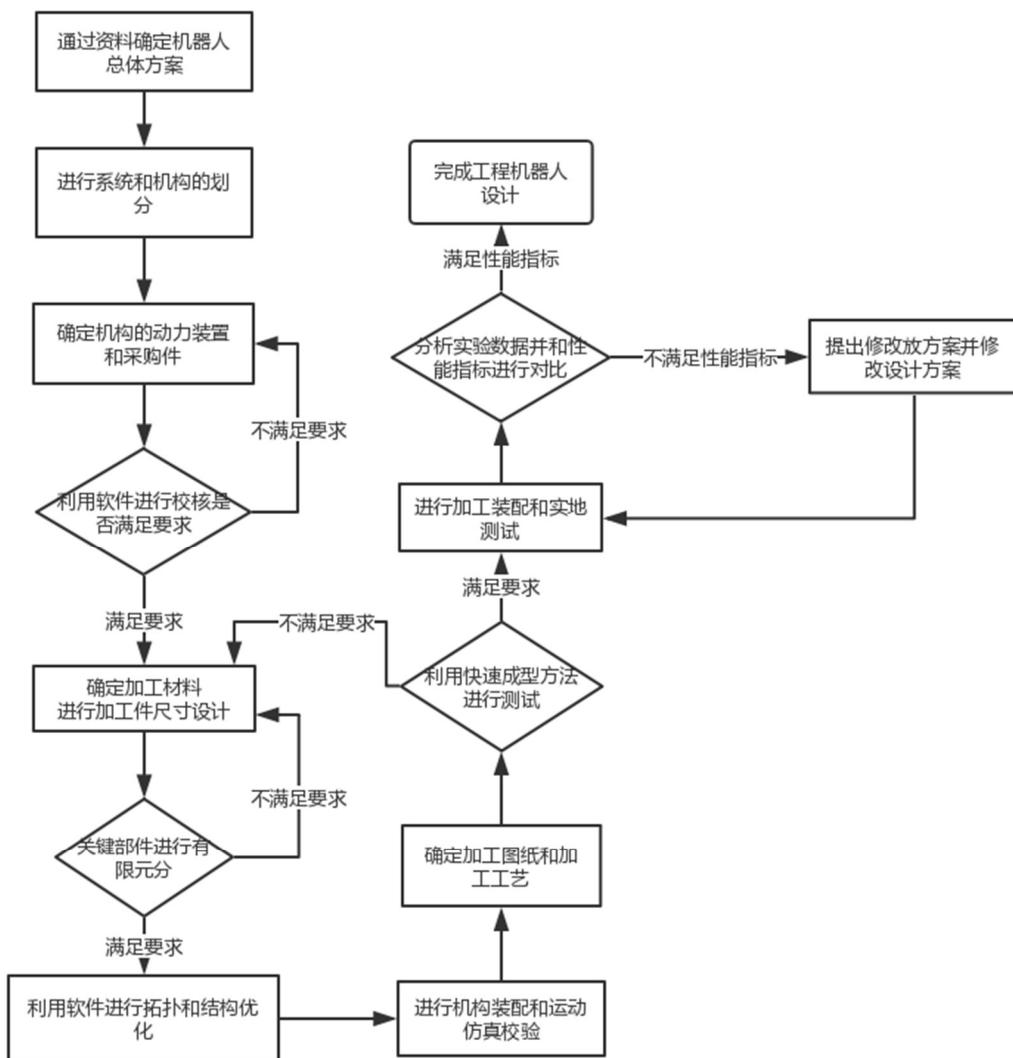


图 1-7 工程机器人设计的技术路线

## 第2章 总体方案论证与设计

### 2.1 整体方案设计

#### 2.1.1 整体结构方案选定

参考比赛规则，工程机器人需要具备行驶和获取图像两个基本功能，除了基本功能，还需要具备救援，取弹，登岛，补弹四个特殊功能。工程机器人的整体结构方案设计围绕这六个功能展开。

其中对机器人影响结构最大的功能是登岛，行驶、取弹、补弹三个功能的结构设计会因为登岛方式不同发生改变，根据现有工程机器人登岛形式，工程机器人可以分为三类：

1. 第一类是通过辅助支撑形式，登岛的位置是两级 200 mm 台阶，利用升降机构将地盘抬起，辅助支撑轮挂住资源岛台阶，再分批次收回伸缩机构，完成登岛，参考图 1-1 中国矿业大学工程机器人。
2. 第二类是利用增大摩擦力的方式，使一端底盘抬起，将机器人重心推过台阶边缘，登上资源岛台阶，使用的方式有履带和摩擦轮组等，比较有代表性的是 Robomaster2018 赛季哈尔滨工业大学的月球车工程机器人。
3. 第三类是利用登岛立柱，将车体部分与立柱固连，使用升降机构将整车抬升到大于地面高度 400mm 位置，在立柱上经过一次转向，登上资源岛。



图 2-1 Robomaster2018 赛季哈尔滨工业大学工程机器人

因为场地和机器人间相互配合问题，取弹和补弹位置有多个不用高度，因此需要升降系统来调整高度。三种类型机器人中第三类机器人结构相对简单，拥有最长的升降行程，因此进行取弹和补弹操作可以相对灵活。而且底盘高度较低，没有伸缩机构或者辅助轮组，机器人重心可以做的很低，在赛场上不容易发生侧翻现象，最终选定工程机器人的方案为采用抱柱的方式登岛。

对整车按功能进行划分，可得到 7 大系统：

1. 行驶系统：承载车身，在赛场移动；
2. 升降系统：辅助登岛，取弹，补弹，提供相应高度和相对位移；
3. 登岛系统：完成和登岛立柱定位，固连操作，并将车身以立柱为圆心，转过一定角度；
4. 取弹系统：抓取图 1-5 中所示各位置弹药箱，完成反转操作，获取弹药箱中 42mm 弹丸；
5. 拖车系统：完成和阵亡机器人固连分离操作；
6. 补弹系统：储存获取的 42mm 弹丸，将弹丸补给到英雄机器人弹仓；
7. 云台：承载图传相机图 2-2，并可以转动一定角度为操作手提供视野。

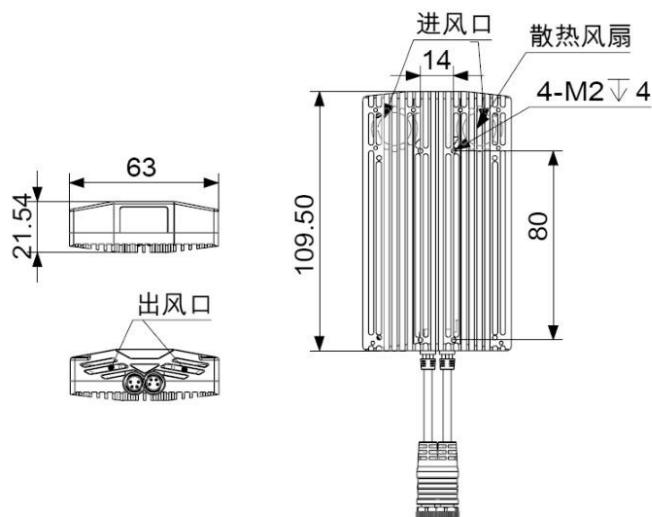


图 2-2 RoboMaster2019 赛季官方提供的图传发射端

后续工程机器人设计将围绕 7 大系统的结构分析展开，图 2-3 为工程机器人简图。

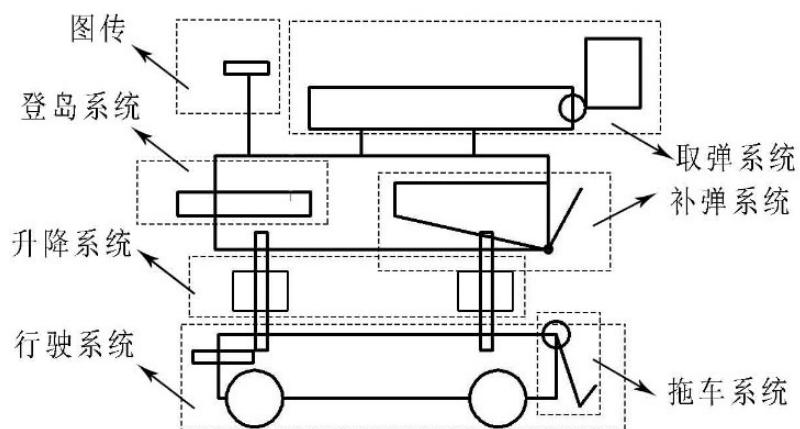


图 2-3 工程机器人简图

### 2.1.2 整体加工方案选定

工程机器人有 35 kg 重量限制，因此在满足强和性能的前提下要减轻重量，往届比赛中大部分机器人主要零件一般采用板材 CNC 加工，框架部分采用型材切割后焊接或者栓接，经过多年验证，这是一套高效的基本方案，具有加工周期短，装配快速，质量轻等特点。

参考 Robomaster2018 比赛工程机器人机械设计所使用的板材种类，以及米思米 FA 目录提供的板材性能手册，3240 环氧板比重较轻，绝缘性能良好中温条件下有很好的机械强度和机械加工性能以及较低的成本，从性价比角度来讲 3240 环氧板是一种理想的机器人加工材料，但层压板属于各向异性材料，在使用过程中需要考虑到布置方向才能发挥最佳机械性能。当强度不满足要求的一些情况下可以用 Fr4 环氧板，碳纤维板进行替代(南洪尧, 2018)。

型材中铝合金型材种类较多，比重轻，相同截面形状的型材可以通过选择不同牌号来找到满足强度要求，适合制作机器人框架。

零件之间相互连接部分一般采用栓接的形式，方便装配，但在机器人设计过程中栓接部分必须考虑到防松问题，尤其是传动部分，螺母很容易松动，因此需要使用防松螺母或者螺纹胶来防止松动(李维荣 and 朱家诚, 2003)。

参考机器人成熟方案可以确定机械加工初步方案见表 2-1，为了减轻重量，框架部分将会采用铆接的方法进行固定，部分强度要求比较低但形状特殊的零件采用 3D 打印的方法加工，如气缸固定架。

表 2-1 工程机器人整体加工方案

结构	加工方式	材料	连接方案
框架部分	铣床加工	2A16 铝合金方管	铆接
平面零件	雕刻机 CNC 加工	3240 环氧板	栓接&铆接
低强度结构件	3D 打印	PLA	栓接
高强度结构件	数控车&数控铣	7075 铝合金	栓接

## 2.2 系统方案选择

### 2.2.1 行驶系统方案选择

工程机器人在比赛中需要灵活移动，并且可以通过复杂地形。麦克纳轮移动平台是一种不需要转向机构直接通过控制四个轮子转动方向完成任意方向运动的平台。如图 2-4 麦克纳姆轮是由若干个与轴线成 45 度角的梭形滚子围绕轮毂组成的轮子，麦克

纳姆轮分为左旋和右旋，当四个轮子采用米字型布置，通过四轮不同转向即可实现平面上图 2-5 10 种基本运动方式因此麦克纳姆轮平台非常适合作为工程机器人的行驶系统，如果采用麦克纳姆轮移动平台可以简化底盘机构提升机器人稳定性(Tlale and Villiers, 2009)。

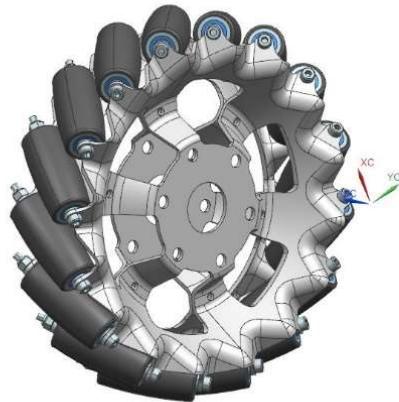


图 2-4 右旋麦克纳伦

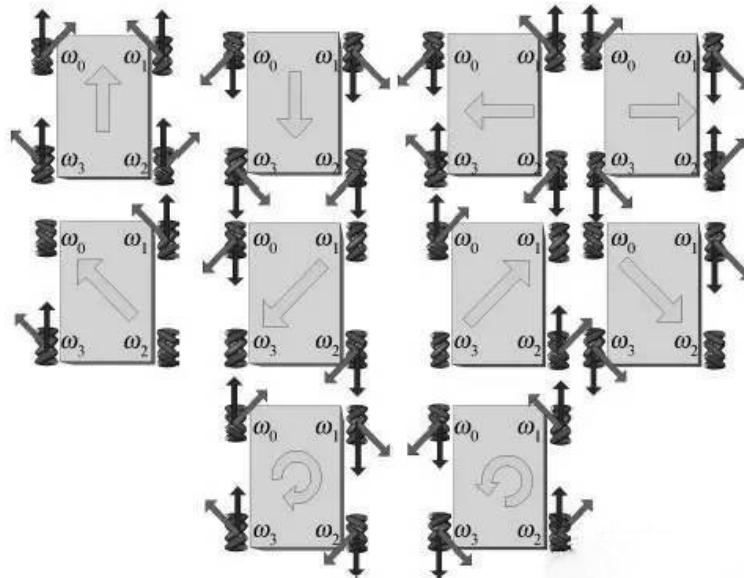


图 2-5 米字型布置麦克纳姆轮平台运动简图

麦克纳姆轮运动过程中会有因为打滑引起的震动，而且完成平面运动需要四个轮子相互配合，保证时刻和地面贴合，因此需要配置悬挂系统。根据麦克纳姆轮的运动特性和减少悬臂梁使用的原则，悬挂系统采用独立纵臂结构(周华, 2011)。

在工程机器人在完成岛上取弹操作后需要进行下岛操作，如果利用登岛立柱进行下岛，需要再次进行对位操作，比较浪费时间，如果采用从两级 200 mm 台阶位置直接下岛，可以节约大量时间，但这样做可能会让超过减震正常工作范围，因此需要在悬挂中增加二级缓冲装置，保护减震。

当机器人安装了独立悬挂系统后，会出现一定的点头现象，也就是当工程机器人升降机构升高，进行弹药箱抓和登岛立柱取对位操作时，重心会随之升高，行驶系统不断启停，前后车轮支持力不断改变。这样会让减震会来回收缩，车身发生剧烈晃动影响对位。所以需要一套装置在抓取弹药箱和抱柱过程中锁紧减震，增加悬挂系统刚性，减轻称身晃动(徐志刚 et al., 2014)。

行驶系统的动力原件采用 M3508 减速电机套装，这是一款适合 50 kg 以下机器人的无刷减速电机。M3508 空载转速 482 rpm 持续最大扭矩 3 Nm 在 3 Nm 下最大转速为 469 rpm。内置传感器可以反馈角度速度等信息，可以支持 CAN 总线控制，使用外置 C620 电调，可以达到 20 A 最大持续电流。非常适合作为麦克纳姆驱动电机(郁大鹏, 2017)。

### 2.2.2 升降系统方案选择

升降系统是工程机器人重要组成部分，需要提供抓取，抱柱，补弹，初始位置四个高度，所以升降系统要做到行程可调。可以实现这种传动的形式有链传动，齿轮齿条传动以及带传动。链传动存在传动不平稳的现象，齿轮齿条传动平稳但是质量很大。带传动中的弧齿同步带图 2-6 有以下特点：(庄工, 1989)

- (1) 传动准确，工作时无滑动，具有恒定的传动比；
- (2) 传动平稳，具有缓冲、减振能力，噪声低；
- (3) 传动效率高，可达 0.98，节能效果明显；
- (4) 维护保养方便，不需润滑，维护费用低；
- (5) 可用于长距离传动，中心距可达 10 m 以上；
- (6) 传动系统质量轻，张紧方便。

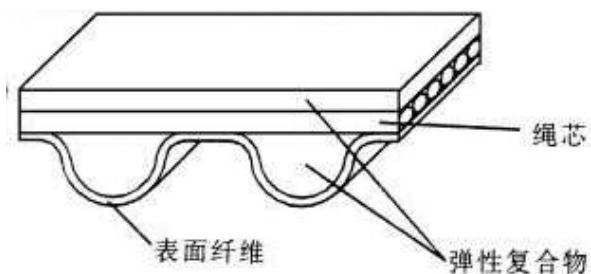


图 2-6 弧齿同步带结构

通过比较，同步带传动适合作为升降系统的传动方案，升降系统除了需要传动还需要引导装置保证在竖直方向的移动准确性，需要一套可以限制 5 个自由度只保留 Z 方向移动的引导装置。双光轴和直线滑轨是比较成熟的引导方案，但是二者质量都非常大，而且允许晃动的范围比较小，容易引起自锁现象。因此需要单独设计一套适合工程机器人的引导装置。

### 2.2.3 登岛系统方案选择

登岛系统的功用有三个，首先要完成工程机器人与登岛立柱的定位，然后需要和立柱部分固连，借助升降系统将整车抬升一定高度，最后要推动机器人完成 180 度旋转。根据夹具定位原理分析，车在登岛上上升过程中底盘要保留两个自由度，Z 方向移动和 Z 方向转动，因此要限制 4 个自由度。抱柱部分要保留 1 个自由度，Z 方向转动，限制 5 个自由度，因此工程车底盘部分采用宽 V 型块定位，抱柱部分采用窄 V 型块加一个平面定位，为了简化机构，采用重力夹紧车身。

参考图 2-7 车身最大设计质量为 35 kg，重力近似 343 N，按照定位方式将产生一个  $343 \times 400$  Nmm 的力矩，因此需要另一组力来平衡力矩维持车身稳定，根据这个结论在车的保险杠位置以及抱柱位置安装 V 型块用来抵消不平衡力矩，车在上升过程中力矩不变，但两个 V 型块相对位置变小，且根据力学平衡原理，所受的压力将会减小，因此在进行强度设计的时候满足最低位置强度设计要求即可。

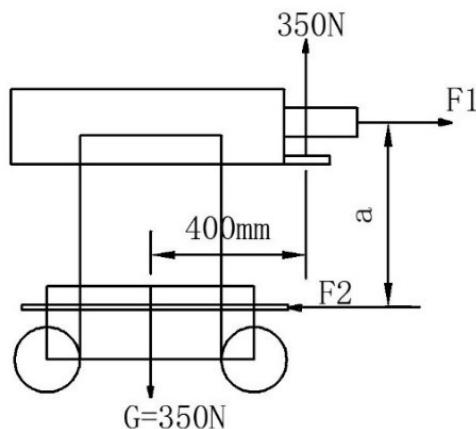


图 2-7 工程机器人抱柱过程中受力分析

机器人在空中旋转 180° 有两个方案，第一种情况是在 F1 的受力位置安装一组摩擦轮，提供一定的转矩，让车身旋转 180°。第二种方案是在力臂最大位置布置一个涵道风扇，利用空气的推力，将车身推动 180°。第一种机械结构相对复杂，但是较为精准。第二种结构简单，重量轻，但存在一定不控角度，借助陀螺仪可以实时检测角度可以改善角度不可控问题。为了减轻机器人重量，采用方案二进行 180° 转动。

#### 2.2.4 取弹系统方案选择

工程机器人取弹装置是整个机器人的核心部分，因为弹药中线距离资源岛边缘存在三个距离，分别是 400 mm, 390 mm, 155 mm，因此需要一套伸缩机构适应这三个位置，除了距离，在抓取过程中还要考虑到抓取机构宽度不能超过 400 mm，否则会发生干涉情况。

为了保证夹取的准确和迅速，夹取伸缩部分采用气动控制，反转部分采用电机翻转。气动控制的优点在于结构紧凑，可以通过压缩空气获得很大的夹紧力，而且调速方便，适合用作机器人行程固定的伸缩机构。因此，本设计的取弹系统采用以压缩空气做动力源的固定行程伸缩机构。

#### 2.2.5 拖车系统方案选择

拖车系统的设计一般采用和步兵机器人或者英雄机器人保险杠固连的方式，有机械式和电磁式两种，机械拖车一般利用气缸驱动的曲柄滑块四杆机构，通过钩子和保险杠连接，电磁式是通过大吸力电磁铁和保险杠上安装的磁性材料紧密接合完成拖车。

相比于电磁式拖车，机械式拖车重量较轻，不需要在保险杠上安装磁性材料，而且可以和夹取机构共用气源，所以采用机械式拖车。

#### 2.2.6 补弹系统方案选

补弹系统由仓门和弹仓两部分组成，仓门开合可以利用气缸驱动曲柄滑块四杆机构完成开合，结构较轻，机构简单。

弹仓部分主要起到储存 42 mm 大弹丸和引导弹丸流动的作用，参考弹仓设计可以采用 PC 板激光切割的方式加工，PC 具有很好的韧性，不容易在碰撞过程中发生断裂(张泽东 et al., 2019)。

#### 2.2.7 云台方案选择

云台主要是承载官方提供的图传，因为工程机器人完成的动作较为复杂，而且不同功能模块位于车身不同位置，因此需要一个云台提供视野，比较成熟的驱动电机有 GM3510 无刷电机，结构比较紧凑，内置电调，可以反馈位置信息，因此云台的基本方案是利用 GM3510 设计一个两轴云台(刘瑞 et al., 2010)。

## 第3章 系统结构设计

### 3.1 行驶系统结构设计

#### 3.1.1 底盘轮组结构设计

工程机器人需要在赛场上灵活移动，并且能够方便维修，根据往届比赛数据和参考文献工程机器人底盘性能指标表 3-1 所示。其中麦克纳姆轮直径根据市面现有厂商标准选择，152.4 mm 麦克纳姆轮在机器人底盘设计应用较为广泛，结构稳定，辊子寿命大于 300 km，经过多年竞赛考验，152.4 mm 麦克纳姆轮可以胜任底盘轮组的要求(郑仁辉, 2017)。

表 3-1 工程机器人底盘性能指标

主要指标	参数
移动方式	四轮独立驱动
自重（包含裁判系统）(kg)	≤ 37.6
最大移动速度 (m/s)	≥ 2.5
底盘极限长度 (mm)	800
底盘极限宽度 (mm)	800
移动轮直径 (mm)	152.4
车轮静摩擦系数 $\mu$	0.3

机器人在启动时，四个轮均为主动轮，四个轮子受到静摩擦力，此时单轮阻力为：

$$F_f = \frac{\mu \cdot mg}{4} = 27.63N \quad (3-1)$$

启动时需要克服的摩擦力矩为：

$$T = \frac{F_f \times d}{2} = 2.1Nm \quad (3-2)$$

按照最低传动效率  $\eta=0.75$  计算，电机需要的启动力矩为：

$$T_1 = \frac{T}{\eta} = 2.8Nm \quad (3-3)$$

因为车轮在启动时所受的阻力为静摩擦力，远远大于运动状态时的滚动摩擦力，因此可以根据驱动力矩来选取电机。

往届比赛机器人底盘应用最广泛的电机为 M3508 无刷电机，图 3-1 为 M3508 的结构图，表 3-2 为电机的基本参数，因为电机内置编码器，配合 C620 电调可以实现电流闭环，图 3-3 为电流闭环时的电机负载特性曲线，从中可以看到电流闭环能让电机稳

定运行在最高效率区域，通过电流闭环还可以减小功率波动，增加机器人电路的稳定性（刘革菊 and 董立新, 2012）。

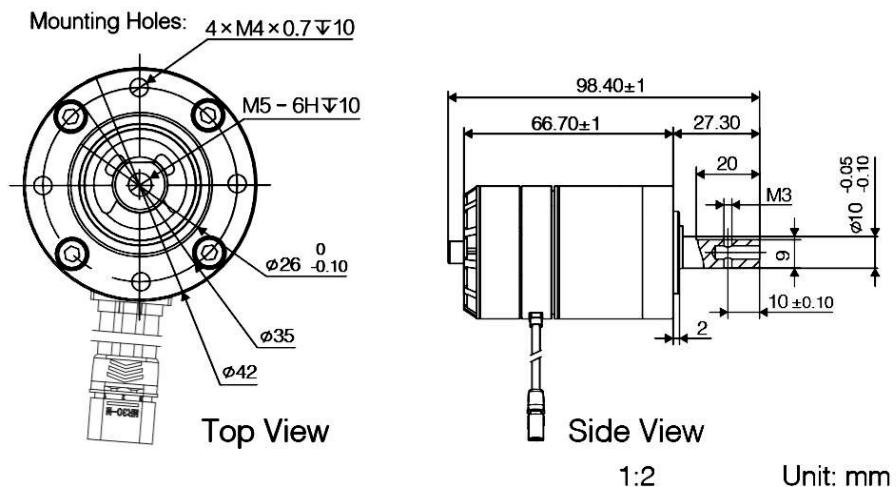


表 3-2 M3510 电机特征参数

**M3508 搭配 C620 电调特征参数**

空载转速	482 rpm
空载电流	0.78A
额定转速	469rpm
额定转矩（最大连续转矩）	3Nm
额定电流	10A
最大效率	70%

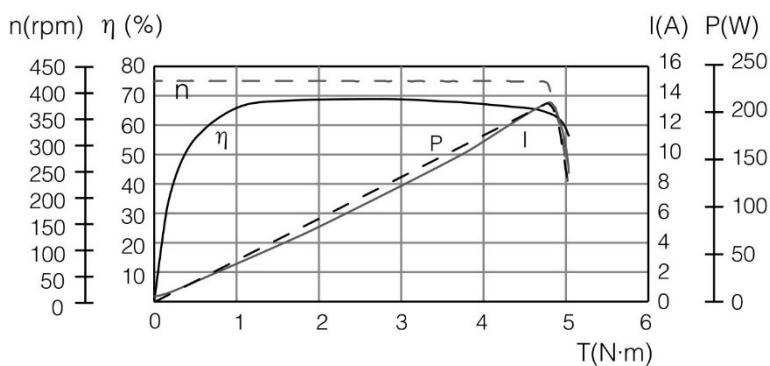


图 3-2 M3508 电机使用 C620 电调做速度闭环控制负载特性曲线

经过分析，M3508 满足工程机器人底盘轮组设计需要，轮组部分的尺寸推导可以围绕 M3508 展开。图 3-3 为单侧轮组结构图，轮组采用纵臂式悬挂，可以有效减小工

程机器人车体宽度，减震的选型为 HITI-100-20-30-20-2- MN，有 20mm 压缩量和 30mm 调节量，弹力系数  $k=4N/mm$ 。为了防止点头，轮组安装气动锁定装置。

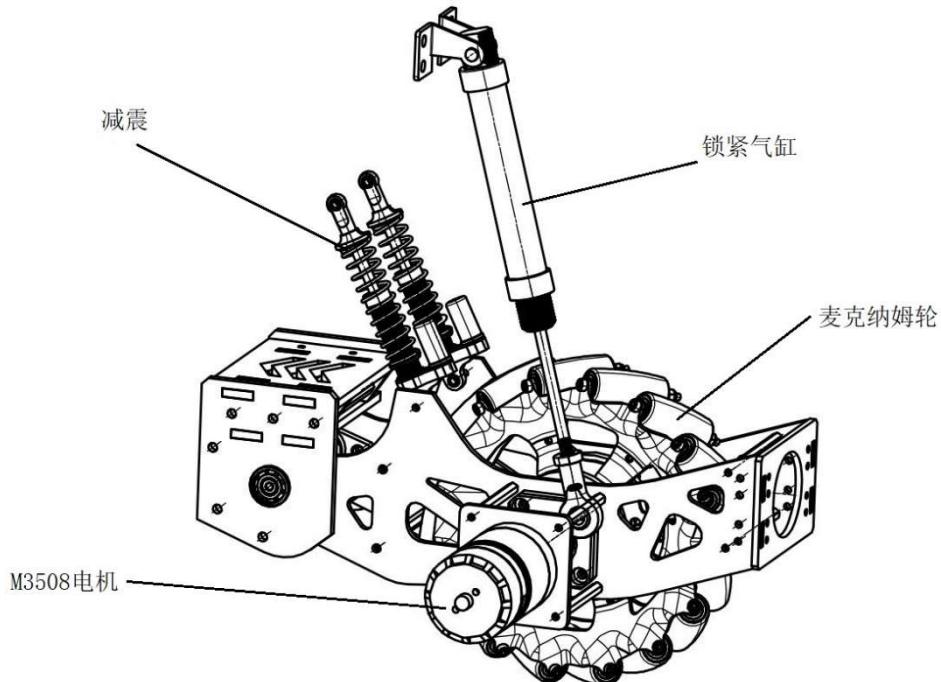


图 3-3 底盘轮组结构图

根据下岛的功能需要，轮组安装二级缓冲装置，图 3-4 所示，在麦克纳姆轮安装边板位置增加了机械限位，当减震压缩到极限位置时，机械限位相互接触保护减震。

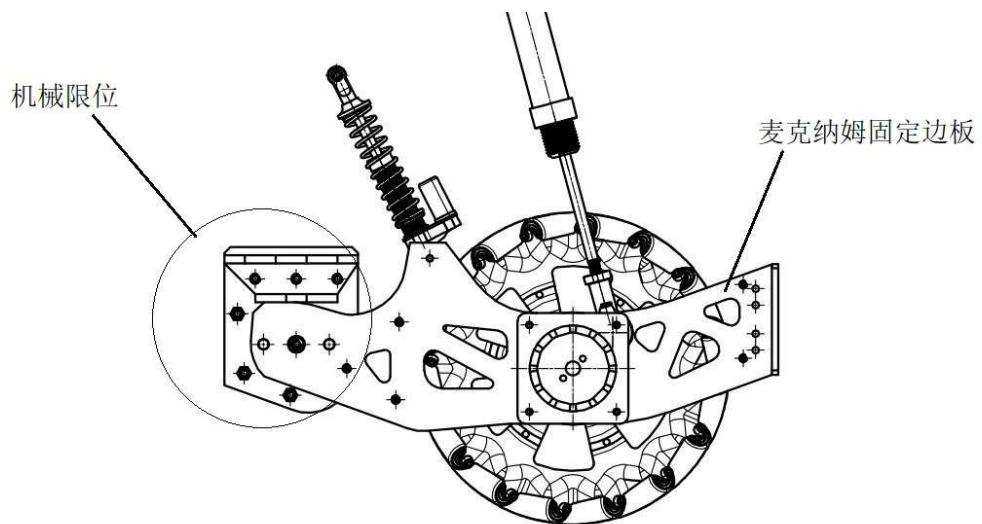


图 3-4 轮组机械限位位置

当减震压缩极限时，麦克纳姆轮边板受力较为复杂，利用传统的受力分析方法校核比较困难，这里利用 Nastran 进行有限元分析来验证使用强度(程永奇 et al., 2010)。

首先对零件进行 3mm 正四面体 8 节点网格划分，根据受力情况，在接触位指定了两个固定约束，来模拟机械限位接触情况，在轴承座固定位置指派了轴承力，假设只有前轮和地面接触，单侧轮受力为 18.6 kgf，图 3-5 所示。

然后进行材料指派，根据文献资料，层压板为正交各向异性材料，因为只对单方向进行分析，所以只需要考虑垂层向参数，3240 环氧板杨氏模量  $E=24GPa$ , 泊松比  $\nu=0.35$ , 屈服强度  $\sigma_s=350MPa$ 。

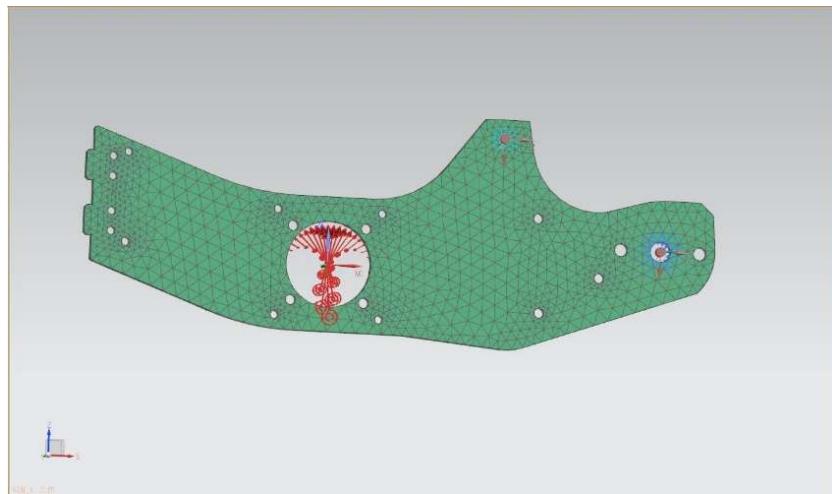


图 3-5 麦克纳姆固定边板分析模型

经过分析，可以得到主应力最大值为 12.75 MPa，安全系数 S 取 4，根据式 3-4 可得许用应力  $[\sigma]=87.5 MPa$ ，最大主应力远低于需用应力，因此强度满足要求

$$[\sigma] = \frac{\sigma_s}{S} = 87.5 MPa \quad (3-4)$$

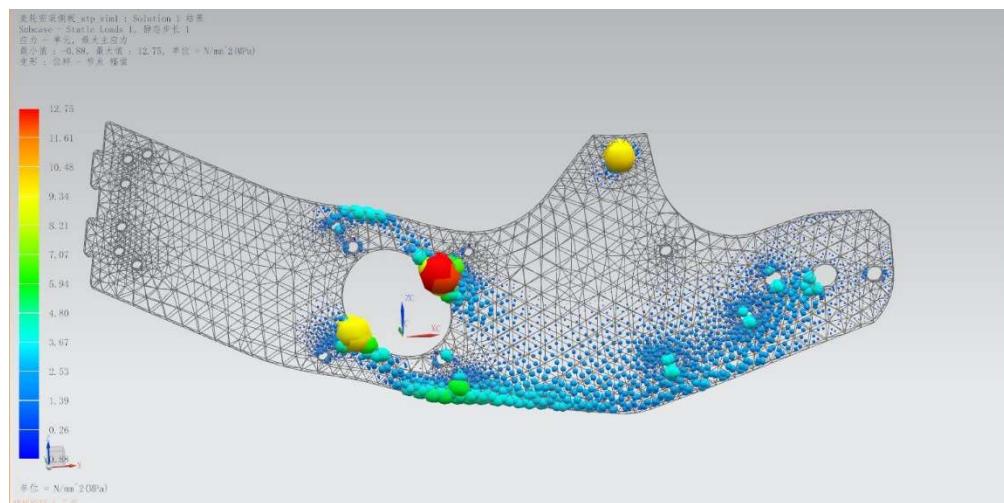


图 3-6 麦克纳姆轮边板主应力分析结果

相同条件下在将模型导入 Toptimizer 中进行拓扑优化，进行 21 次迭代后，可以得到图 3-7 分析结果，其中蓝色区域为可优化区域，根据结果对麦克纳姆固定边板进行了镂空。

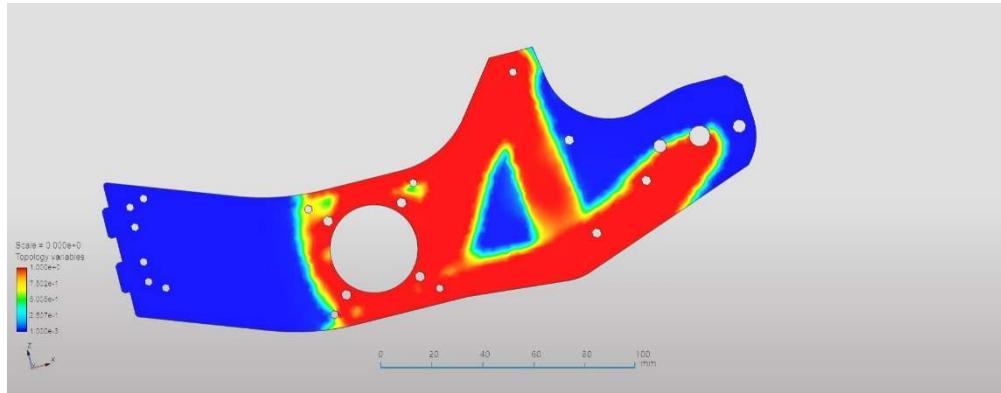


图 3-7 拓扑分析结果

### 3.1.2 底盘车架结构设计

工程机器人底盘车架设计需要满足承载车身和提供连接位置的要求，首先要保证机器人在正常行驶过程中底盘结构不发生塑性形变，其次要为轮组，升降系统，拖车系统，抱柱系统和官方裁判系统预留一定的固定位置。图 3-8 表示了底盘车架各部分组成。为了保护轮组，在车架上安装了保险杠。

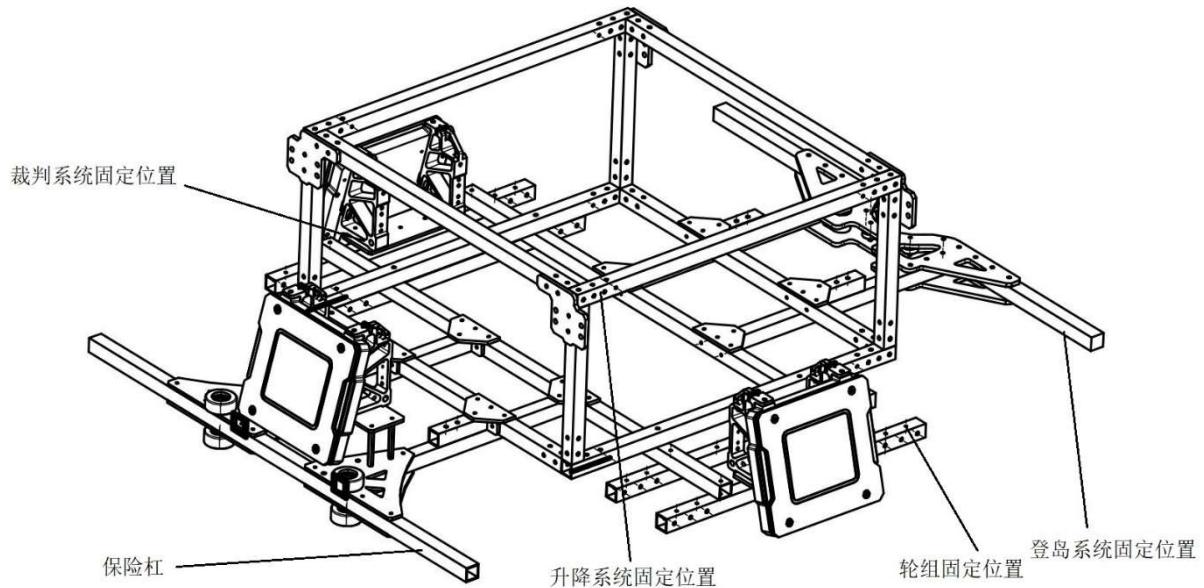


图 3-8 底盘车架结构图

为了方便调整轮距底盘采用了双横梁，四纵梁结构。这样的结构可以实现车架结构调整后，轮组结构不发生改变。图 3-8 为车架底盘和轮组装配后的结果，最终结果为工程机器人轮距 510 mm，轴距 529 mm。

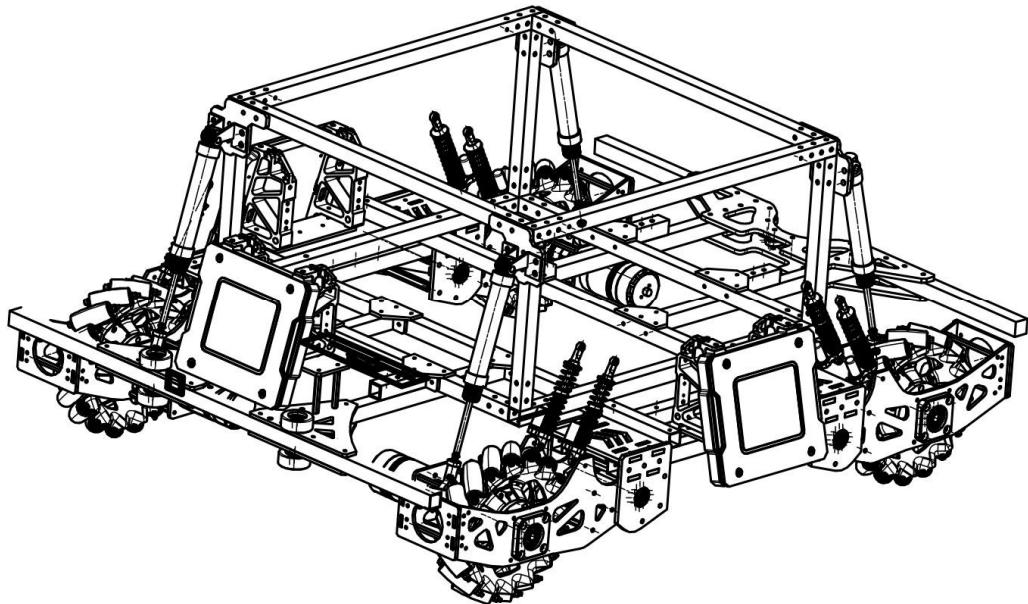


图 3-8 工程机器人行驶系统结构图

## 3.2 升降系统结构设计

### 3.2.1 升降装置结构设计

工程机器人升降系统是整车最为重要的结构，升降装置是升降系统重要组成部分，在登岛过程中起到提升底盘的作用，在补弹过程中起到升高弹仓的作用，在取弹过程中起到到达预定高度并提升弹药箱的作用。根据比赛规则，参考图 1-3，资源岛地面距离平台的高度为 400 mm，由此可得工程机器人需要借助登岛立柱至少升高  $h_1=400$  mm 才可以到达资源岛平台高度。

根据抱柱系统设计，需要套环升高到距离地面 900 mm 图 1-4 以上的位置才可以进行抱柱。考虑到操作手进行对准过程中，机器人底盘需要不断启停，减震和启动锁紧装置会有轻微压缩，会造成抱柱系统倾斜，因此需要留  $h_2=10$  mm 的余量保证套环不和登岛立柱发生碰撞。

在抱柱系统结束对准后为了确保套环不脱开登岛立柱，需要保证一定的接触宽度。因此升降系统的行程要保证抱柱系统和登岛立柱接合后，底盘才开始提升。设计抱柱系统套环底面与牛眼轴承底面的距离为 80 mm。图 1-4 登岛立柱最高位置距离圆盘 100 mm，因此需要预留相对运动距离  $h_3=20$  mm。

工程机器人在平地静止时，减震器会进行预紧，根据中调节方法离开地面时，麦克纳姆轮回转中心在 X 轴方向的位移为  $x_1=5$  mm(檀润华 and 赵凡, 1998)。

工程机器人在上升过程中，因为自身重力原因，会发生倾斜现象，拟采用两根 15 mm  $\times$  15 mm 壁厚 2 mm 横梁支撑整车，此时横梁受力情况可以简化为一端固定简支梁，根据式 3-5 可以求得一根方管截面惯性矩：

$$I_Z = \frac{BH^3}{12} - \frac{bh^3}{12} = 1838.6 \text{ mm}^4 \quad (3-5)$$

式中：

B—外层宽度；

H—外层高度；

b—内层宽度；

h—内层高度。

机器人最大质量为 37.6 kg，一根简支梁收到的压力  $P=184.24$  N，所用 2A16 铝型材的杨氏模量  $E=70$  GPa。工程机器人变形前车体最大 1 长度为 800 mm，受力点  $a=400$  mm 根据式 3-6 和式 3-7 挠曲线公式可以推出最大挠度  $y_B$  式 3-8：

$$y = \frac{-Px^2}{6EI} (3a - x) (0 \leq x \leq a) \quad (3-6)$$

$$y = \frac{-Pa^2}{6EI} (3x - a) (a \leq x \leq l) \quad (3-7)$$

$$y_B = \frac{-Pa^2}{6EI} (3l - a) = 6.28 \text{ mm} \quad (3-8)$$

因此需要比实际高度增加  $h_4=6.28$  mm 考虑到连接部分间隙  $h_4$  取 10 mm。

所以如果满足登岛要求升降系统的极限行程  $H=h_1+h_2+h_3+h_4=455$  mm。

工程机器人补弹过程中会将弹仓上升到大于英雄弹仓高度进行补弹，英雄机器人弹仓高度为 600 mm，工程机器人弹仓初始高度为 400 mm。满足补弹要求的极限行程  $C=200$  mm。小于  $H$ ，因此可以满足要求。

可以得预留后轮近似位移为  $600 \times \sin(0.6) = 6.28$  mm，因此需要比实际高度增加  $h_4=6.28$  mm 考虑到连接部分间隙  $h_4$  取 10 mm。

所以如果满足登岛要求升降系统的极限行程  $H=h_1+h_2+h_3+h_4=455$  mm。

工程机器人补弹过程中会将弹仓上升到大于英雄弹仓高度进行补弹，英雄机器人弹仓高度为 600 mm，工程机器人弹仓初始高度为 400 mm。满足补弹要求的极限行程  $C=200$  mm。小于  $H$ ，因此可以满足要求。升降装置带轮初定中心距要大于 455 mm，保证有足够的行程。

工程机器人升降装置需要抬升底盘，以及上方各系统，按照抬升全车质量计算，需要抬升 37.6 kg 的重量，为了保证上升过程稳定，需要布置 4 套升降装置，平均到每套升降装置要至少提供  $F=9.4 \text{ kgf}$  的拉力，保证移动灵活，速度要大于 0.5 m/s。根据式 3-9，需要的驱动功率  $P=46.06 \text{ W}$ ，M3508 电机驱动功率满足使用条件。

$$P = Fv = 46.06 \text{ W} \quad (3-9)$$

M3508 最大输出转矩为 3 Nm，根据式 2-10，带轮节圆半径  $r$  要小于 32.5 mm。

$$r < \frac{M}{F} = 32.5 \text{ mm} \quad (3-9)$$

利用麦迪三维设计工具选型后可以得到使用的同步带为 3M 弧齿开口同步带图 3-10 为了结构紧凑采用 20 齿弧齿同步带轮。升降装置结构为图 3-11。

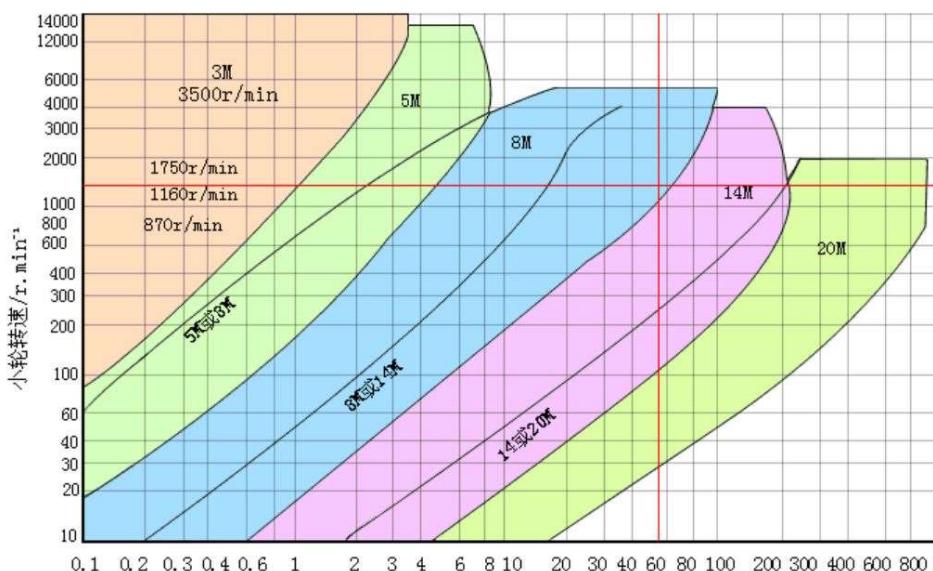


图 3-10 麦迪三维设计工具弧齿同步带选型图

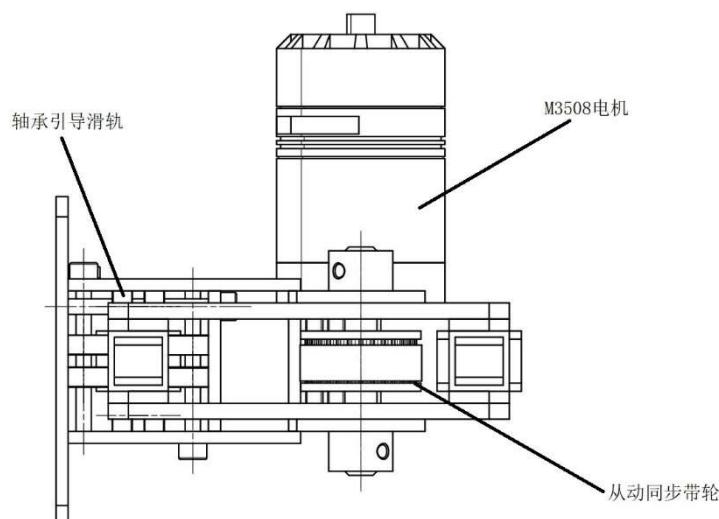


图 3-11 升降装置结构图

除了依靠同步带提供拉力，还安装了引导装置，利用四个方向对置安装的四组轴承，将升降机构的自由度限制为一个方向的直线运动，轴承引导滑轨的引导装置和固定车身的铝方管配合图 3-12，同步带连接侧利用轧带板和同步带相连，固定框侧通过螺栓和固定框连接。

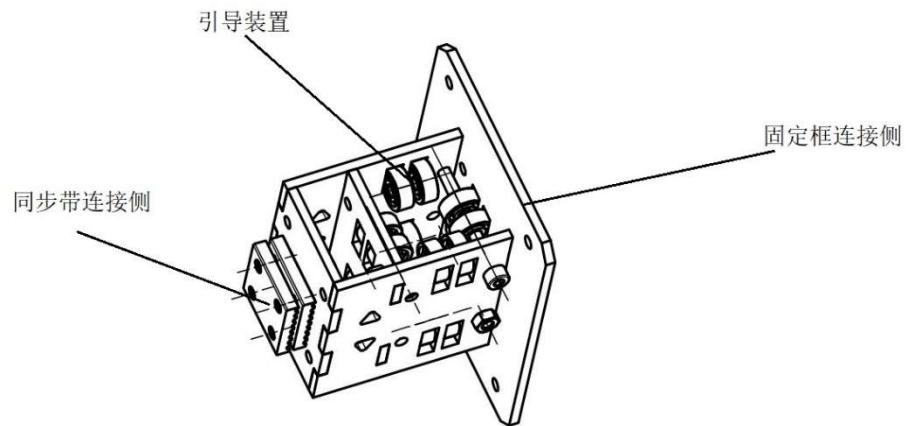


图 3-12 轴承引导滑轨结构图

图 3-13 显示了升降机构和底盘车架的连接方式。

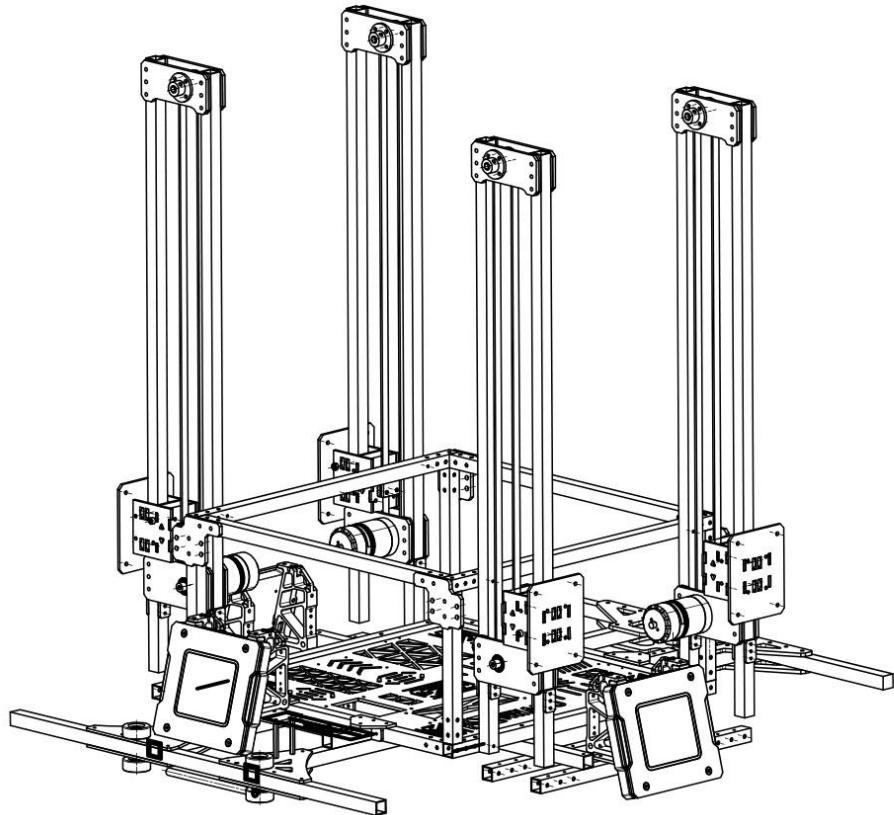


图 3-13 升降机构和底盘车架连接方式

### 3.2.2 固定框结构设计

固定框设计是连接四个升降装置，并且为取弹机构，补弹机构，登岛机构提供固定位置图 3-14。

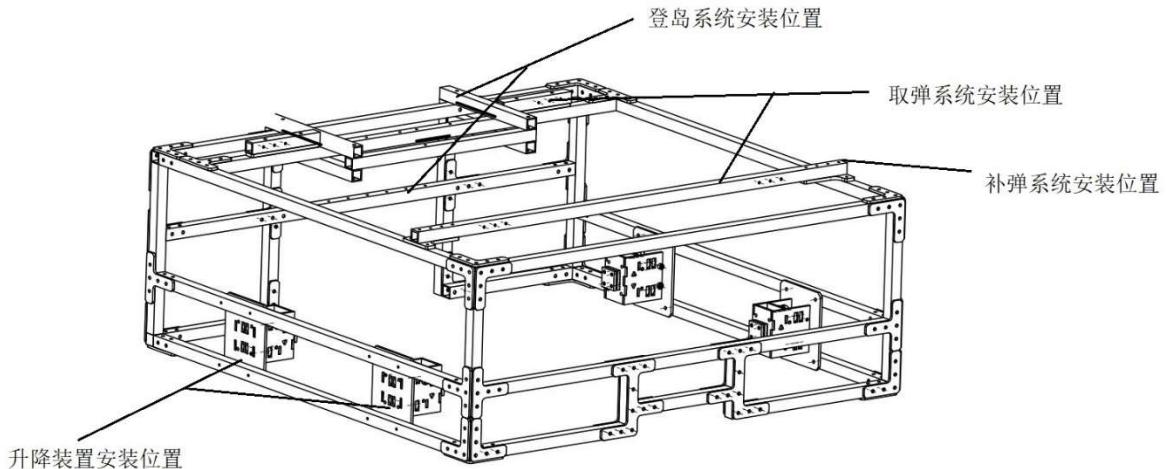


图 3-14 固定框结构图

固定框铝方管连接方式为铆接，通过带孔环氧板将铝方管接在一起，如果出现使用强度不满足要求的情况，可以直接更换环氧板的厚度，从而对整个框架结构不产生影响

### 3.3 登岛系统结构设计

登岛系统的结构设计主要围绕图 2-7 的受力展开，首先需要两个机构来承受平衡力  $F_1$  和  $F_2$ ，还需要一个机构来平衡重力  $G$ ，除了承载三个力外，还需要一个装置提供一定的推力，使工程机器人围绕登岛立柱旋转  $180^\circ$ 。

#### 3.3.1 定位机构结构设计

定位机构主要功用是承载图 2-7 抱柱上升过程中的的压力  $F_2$ ，并让车身和登岛立柱行成定位，定位原理可以利用机械制造技术基础中的 V 型块定位原理，用轴承做一个类似 V 型块的结构，定位登岛立柱的原理，原理如图 3-15，利用圆心相交的方法找到登岛立柱圆心。定位机构将安装在工程机器人底盘车架上，和保险杠固定在一起，两边增加辅助轴承，引导工程机器人对位，如图 3-16。(严红, 2011)

当工程机器人完成对位后上方拉紧机构和承载机构会固定住工程机器人的固定框，此时底盘将保留两个自由度，分别是沿着登岛立柱轴向的直线自由度和旋转自由度。利用升降系统将底盘抬升到距离地面 455 mm 高度，之后涵道助推器提供推力将整车旋转  $180^\circ$  完成登岛。

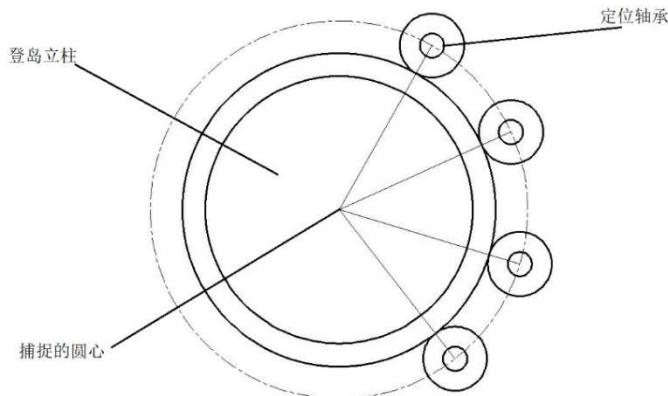


图 3-15 定位机构原理图

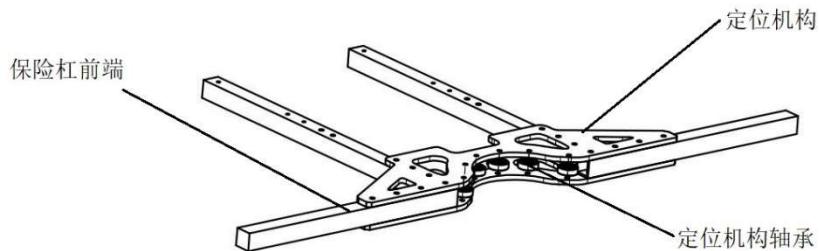


图 3-16 定位机构和保险杠的装配结构

### 3.3.2 拉紧机构结构设计

拉紧机构的功用是承受图 2-7 压力  $F_1$ ，并且保留一个沿登岛立柱方向的自由度，采用了和定位机构相同的结构，为了保证工程机器人不超过规则要求的范围，采用了和升降机构相同的轴承引导滑轨结构，利用一个气缸控制伸缩，机构正常状态如图 3-17 所示。

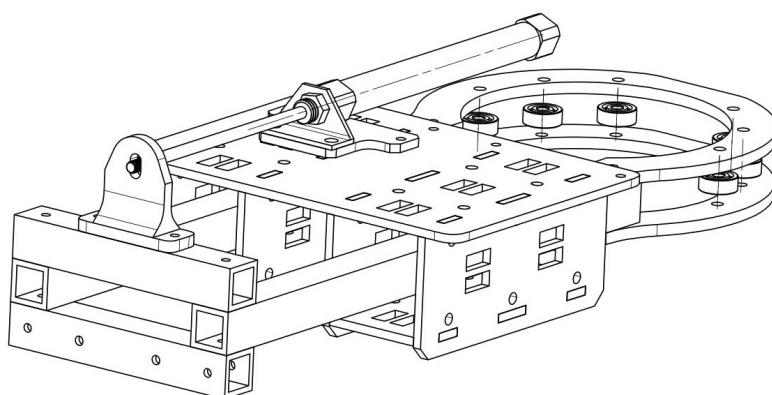


图 3-17 拉紧机构收回状态

当需要进行抱柱操作时，气缸带动拉紧机构弹出，如图 3-18 所示，此时机械限位部分和轴承引导滑套接触，保护气缸不受到拉力。

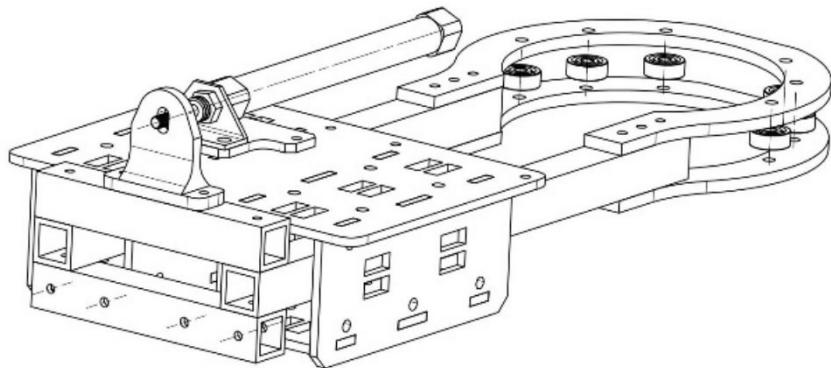


图 3-18 拉紧机构伸出状态

### 3.3.3 承载机构结构设计

承载机构是为了提供支持力，克服重力对机器人的影响，功用是只保留机器人沿登岛立柱转动的自由度，限制其他方向的自由度，采用了四个 15 kg 牛眼轴承承载车身的结构如图 3-19 所示。

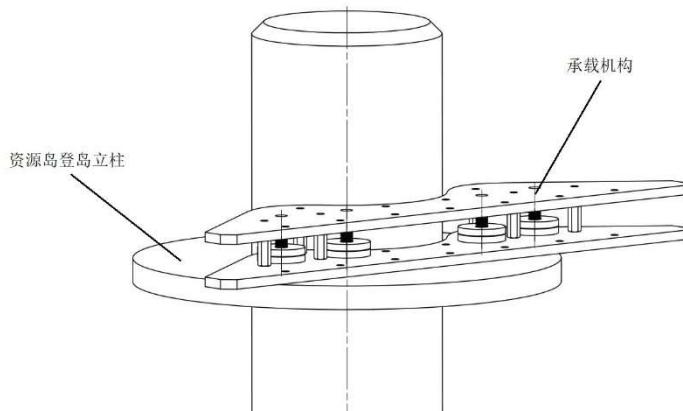


图 3-19 承载机构和资源岛立柱配合方式

图 3-21 为拉紧机构，承载机构和涵道助推器在固定框上的相对位置

### 3.3.4 涵道助推器结构设计

涵道助推器是利用和空气的相互作用力将工程机器推动  $180^\circ$  使工程机器人的投影落在资源岛上，当升降系统回到初始位置的时候，工程机器人落在岛上。选用的涵道为 90 涵道，最大可以产生 2.75 kgf 的推力，为了保证有足够大的转矩，需要将涵道助推器布置在和资源岛登岛立柱距离最大位置，且受力方向与涵道风扇圆心与登岛立柱中心线连线成  $90^\circ$  夹角，极限距离  $y=722$  mm，因此可提供极限转矩  $M=19.4$  Nm。

图 3-20 为涵道助推器的结构图。

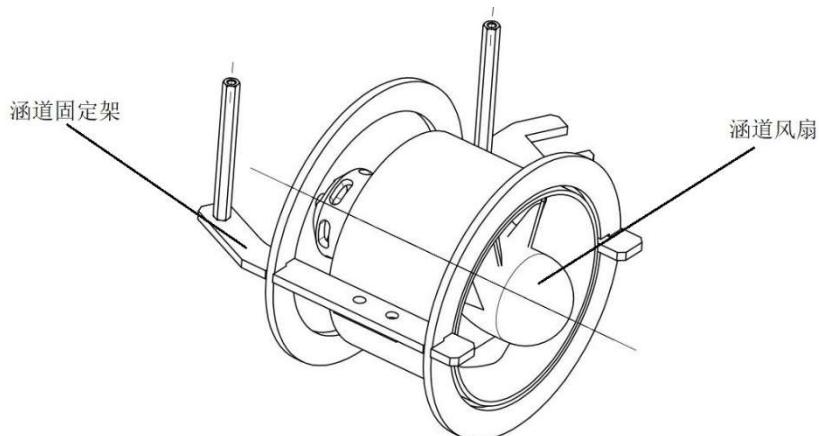


图 3-20 涵道助推器的结构图

图 3-21 为涵道助推器，拉紧机构，承载机构在固定框的相对位置。

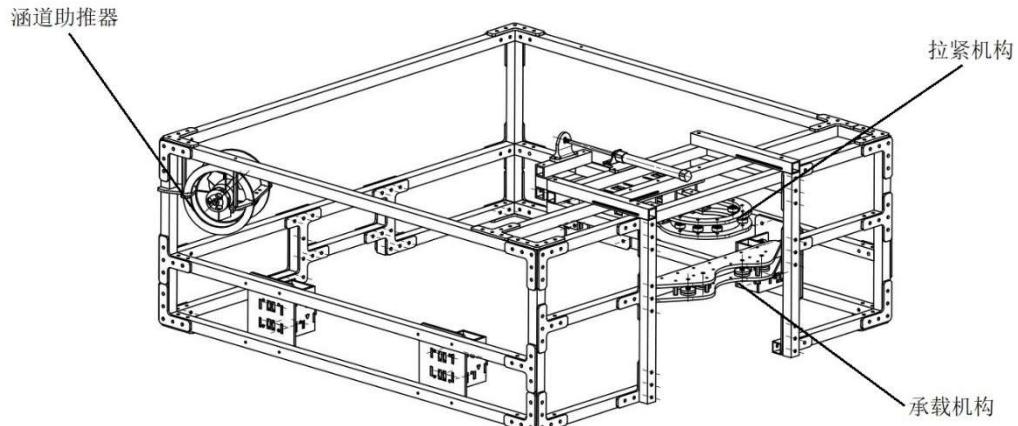


图 3-21 登岛系统在固定框的安装位置

### 3.4 取弹系统结构设计

#### 3.2.1 夹取反转机构结构设计

夹取反转机构的功用是夹取弹药箱，并完成反转操作获取弹药箱中的 42 mm 大弹丸，资源岛弹药箱有两种规格，一种是装有 6 发大弹丸的岛下弹药箱，另一种是装有 20 发大弹丸的岛上弹药箱。夹取机构按照岛上资源岛质量设计，根据测量，岛上弹药箱的质量为 1.25 kg，环氧板和发泡海绵弹药箱的静摩擦系数  $\mu$  取 0.1。通过式 3-10 可以得到夹紧弹药箱需要至少压  $F_N=122.5N$  的压力。

$$F_N = \frac{f}{\mu} = 122.5N \quad (3-10)$$

当气压为 0.7MPa 时，采用缸径 16mm 的气缸可以获得式 3-11 的夹紧力  $F=137.9N$

$$F = P \times \frac{\pi d^2}{4} = 137.9N \quad (3-11)$$

采用双杠夹紧可以获得 275.8 N 的夹紧力，满足夹紧要求。采用单 3508 电机转动方案，可以获得最大 3 Nm 的转矩，根据式 3-12，弹药箱质心距离回转轴的最大距离  $a=245$  mm，考虑到夹取机构质量和传动效率，最大距离  $a$  应该小于 200 mm。图 3-22 为夹取反转机构示意图，当弹药箱时，抓取机构夹紧，升降系统将整个机构升高半个弹药箱高度，然后电机带动传动机构完成反转，将弹药箱的大弹丸倾倒出来，进入下方弹仓中，在电机对称位置设计了相同的安装孔位，当电机扭矩不足时可以增加电机提供额外转矩。

$$a = \frac{M}{G} = 245mm \quad (3-12)$$

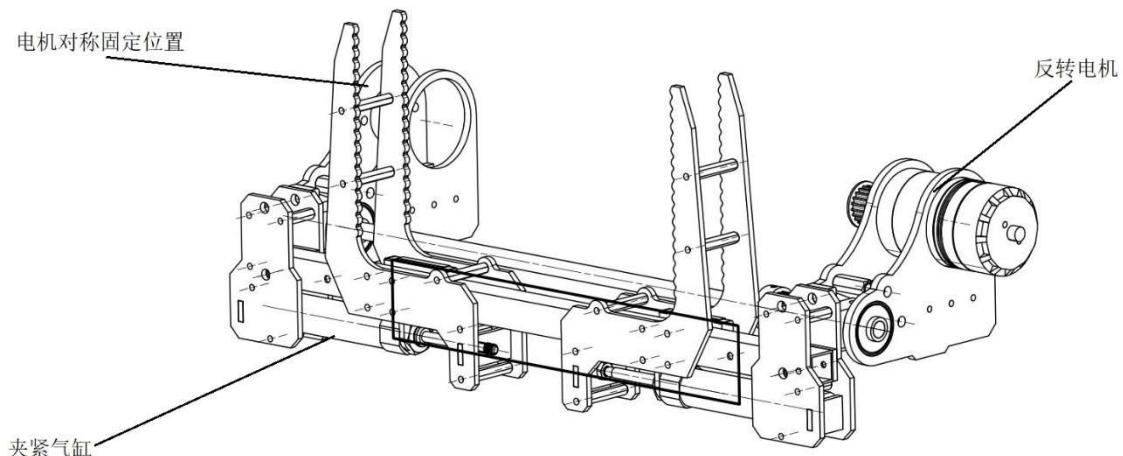


图 3-22 夹取反转机构

### 3.2.2 伸缩机构结构设计

伸缩机构的功用是为夹取翻转机构提供预定位置的，根据第二章的分析结果，弹药箱的预定位置分别 400 mm, 390 mm, 155 mm，其中 400 mm 和 390 mm 弹药箱位置相差 10 mm，可以在同一位置进行夹取。因此只需要 390 mm 和 155mm 两个位置即可，根据设计，夹取反转机构展开后可以自行伸长 20mm，因此两段伸长的气缸分别选取 125mm 和 225mm。结构如图 3-23 所示。

夹取过程中气缸活塞会伸出 350mm 的距离，因为重力原因和导轨的误差会有一定弯曲，因此 225 mm 气缸尾部采用铰链固定，可以让气缸转过一定角度，防止活塞底部密封圈变形，解决了漏气问题。

气缸在伸出时阻力较小，如果不限制流量将会产生巨大冲击，所以在气源部分安装了流量阀，限制气体流量，减小冲击。

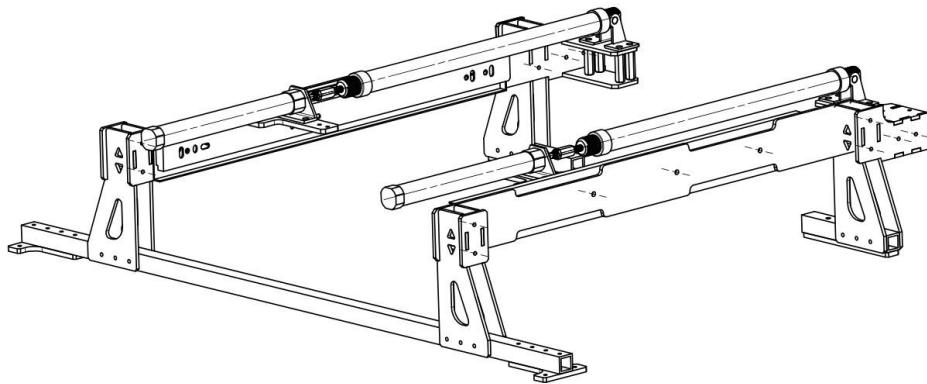


图 3-23 取弹系统伸缩机构

图 3-24 为夹取反转机构，取弹伸缩机构和固定框的相对安装位置。

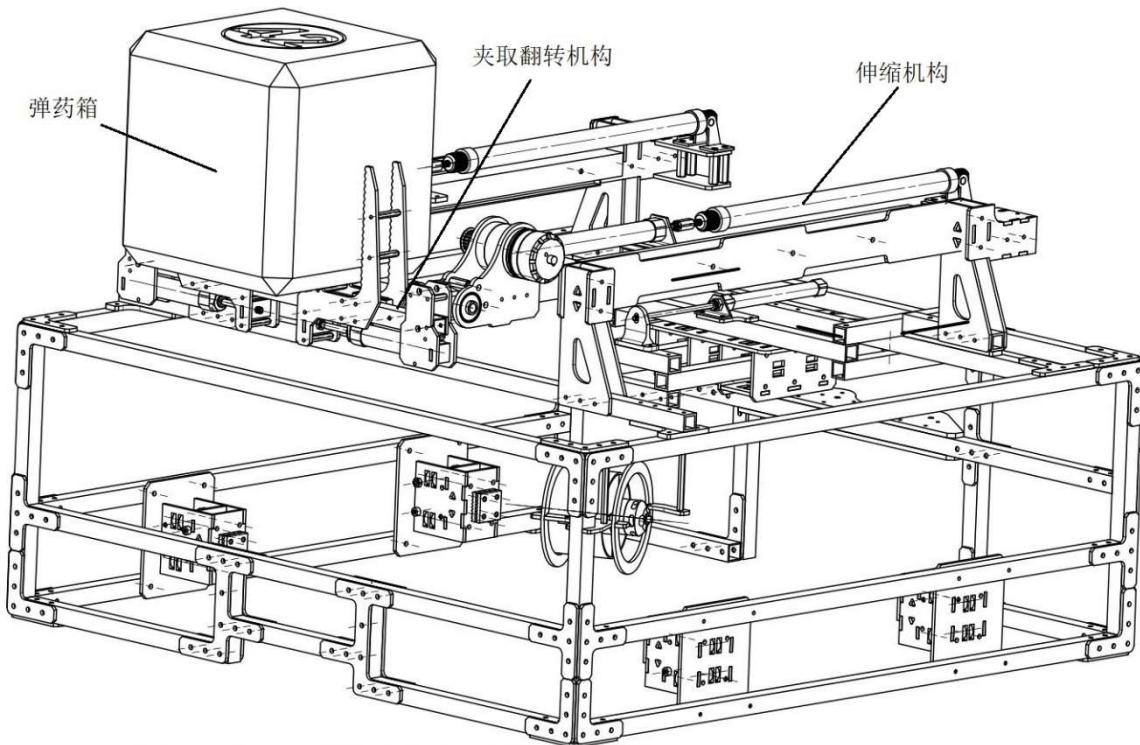


图 3-24 取弹机构装配结果

### 3.4 拖车系统结构设计

拖车机构采用四杆机构，利用一个 25 mm 行程气缸驱勾爪完成和阵亡机器人保险杠固连。

图 3-25 为拖车系统结构简图。

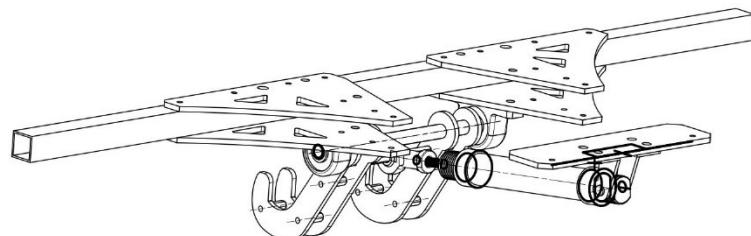


图 3-25 拖车系统

### 3.5 补弹系统结构设计

补弹系统的功用是储存 42 mm 大弹丸，配合升降系统给英雄机器人补弹。弹仓分为两部分，一部分是储存弹药的弹仓；另一部分是仓门，仓门开合机构为四杆机构，弹仓底面倾斜角度为 4°，图 3-26 为补弹系统。(陈建军 et al., 2001)

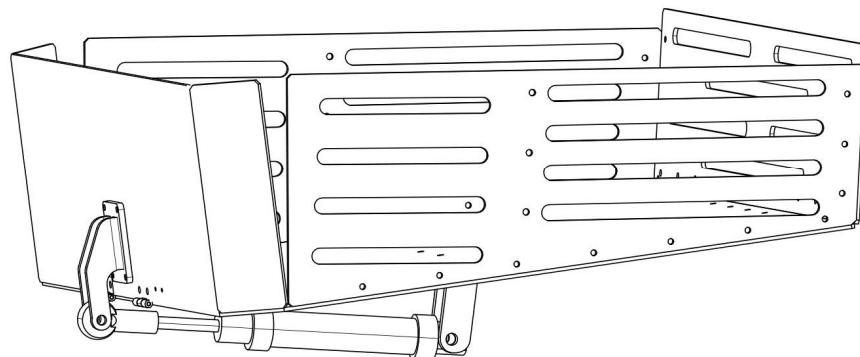


图 3-26 补弹系统

### 3.6 云台结构设计

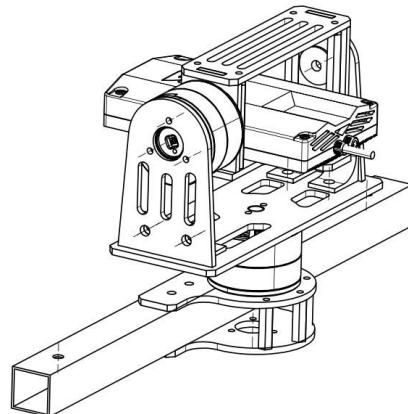


图 3-27 图传系统

云台结构采用两轴结构，由两个 GM3510 电机驱动图 3-27，安装在取弹系统的伸缩装置上，可以随伸缩机构运动，方便操作时进行对位。

### 3.7 气动控制系统设计

工程机器人采用气动控制部分有取弹系统、拖车系统、登岛系统、补弹系统、行驶系统。其中取弹系统的夹取翻转机构和伸缩机构分别利用气缸执行夹取和伸缩操作。拖车系统利用气缸完成拖车钩的伸缩动作。登岛系统的拉紧机构利用一个气缸控制套环的伸缩。补弹系统的仓门利用气缸执行开闭，行驶系统中利用气缸锁紧减震。

气源采用 600 ml 耐压 30 MPa 标准钢瓶，经过双标恒压阀将气压稳定到 0.7 MPa 进入到气源过滤器和油雾器中，接下来进入到汇流板中，由六个二位五通阀分别控制夹取、125 mm 伸缩、225 mm 伸缩、弹仓开合、拖车、抱柱，一个二位三通阀来控制底盘轮组的锁紧气缸，原理图见附录 1。

## 第 4 章 机器人装配与性能测试

### 4.1 机器人装配

机器人装配图见附录 2，显示了各组成部分之间的相对安装位置，其中弹药箱和登岛立柱不是工程机器人零件，只是为了显示执行动作的相对位置。

### 4.2 机器人性能测试

#### 4.2.1 拖车性能测试

工程机器人拖车测试项目为工程机器人拖拽阵亡步兵机器人，阵亡步兵机器人距离工程机器人 5m 位置随意摆放，工程机器人从启动区出发，将阵亡步兵机器人拖回启动区，计算总用时量。测试现场如图 4-1 所示。测试结果见表 4-1。



图 4-1 工程机器人救援测试现场

表 4-1 工程机器人拖车救援数据

测试场次	用时
第一次	18.5s
第二次	22s
第三次	30s
第四次	19.5s

工程机器人顺利完成了拖车救援的测试，没有出现中途脱开的意外情况，正反两侧均能完成拖车操作。

从测试结果数据来看平均拖车时间为 22.5s，符合预期，满足在比赛时拖车救援的需求。

#### 4.2.2 取弹性能测试

工程机器人取弹性能测试项目为工程机器人从距离资源岛 1 米的启动区出发，完成随机摆放在资源岛下方的弹药箱夹取，两箱夹取时间分别计时，弹药箱内装填 20 发 42 mm 弹丸，当弹药箱和工程机器人分离结束计时。取弹性能测试现场如图 4-2 所示。取弹性能测试结果见表 4-2。

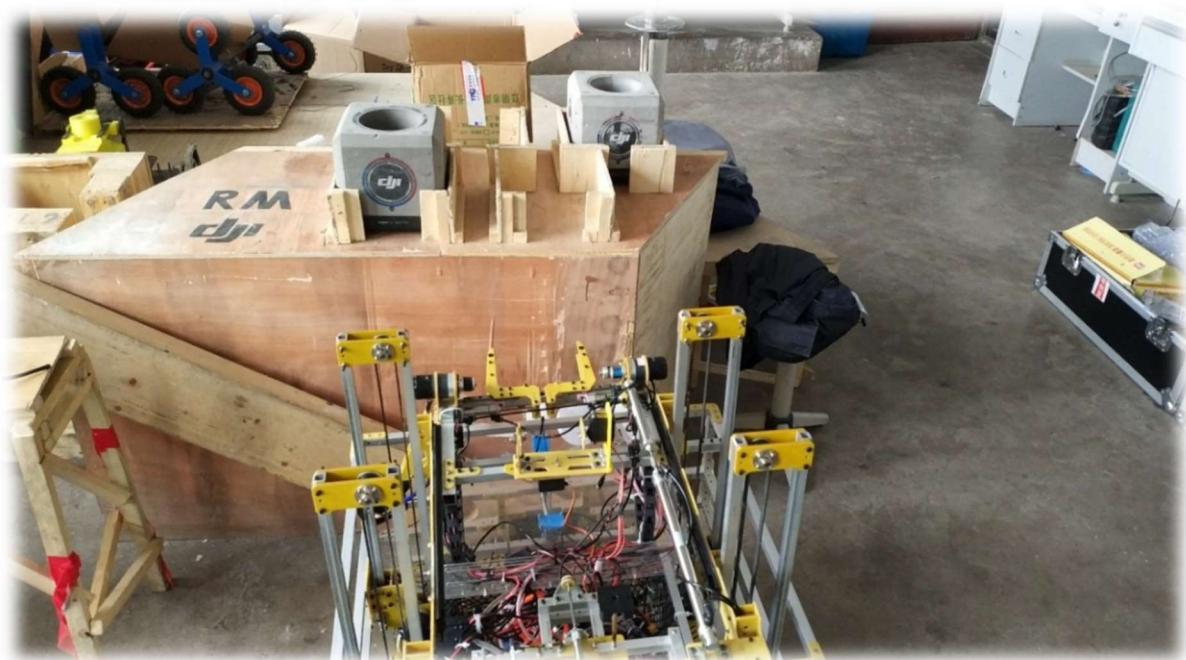


图 4-2 取弹性能测试现场

表 4-2 取弹性能测试结果

测试场次	第一箱用时	第二箱用时	漏弹数量
第一次	12.1s	16.2s	1
第二次	14.2s	20.1s	0
第三次	9.8s	17.5s	0
第四次	10.2s	16.5s	0

从测试结果来看，取第一箱弹药的平均时间为 11.6 s，第二箱的平均时间为 17.6s，漏弹数量为 0.25 颗，符合预期设计目标，因为距离问题抓取第二牌弹药箱速度稍慢，但在可以接收的范围内。

#### 4.2.3 登岛性能测试

工程机器人登岛性能测试项目为工程机器人从距离资源岛 1 米的启动区出发，利用资源岛登岛立柱进行上岛操作，当工程机器人四轮离开资源岛停止计时，登岛性能测试现场如图 4-2 所示。登岛性能测试结果见表 4-2。



图 4-3 登岛性能测试现场

表 4-3 登岛性能测试结果

测试场次	登岛时间	下岛时间
第一次	11.57s	1.69s
第二次	10.11s	2.16s
第三次	10.73s	1.98s

从数据来看平均上岛时间为 10.8s，下岛 1.9s，登岛性能较为优秀，三次测试中没有出现失误情况，第三次下岛后减震固定位置出现了轻微变形，经过分析是螺栓松动问题，之后在底盘车架固定螺栓部分涂抹了厌氧螺纹胶。

#### 4.2.4 补弹性能测试

工程机器人补弹性能测试项目为工程机器人从距离英雄机器人 1 米的启动区出发，携带 20 发 42mm 弹丸给英雄机器人补弹，当工程机器人升降系统归位时停止计时，补弹性能测试现场如图 4-4 所示。补弹性能测试结果见表 4-4。



图 4-4 补弹性能测试现场

表 44 补弹性能测试结果

测试场次	补弹时间	漏弹数量
第一次	13.7s	0
第二次	11.2s	0
第三次	6.8s	0

从测试结果来看平均补弹速度为 10.6 s，没有发生漏弹情况。符合设计要求。

## 第 5 章 总结

经过工程机器人性能测试和 Robomaster2019 机甲大师赛的比赛检验，本设计完成了预期目标，并且可以在比赛中可以稳定运行，达到了场均抓取 4.5 箱弹药，补弹 1.5 次，拖车救援 1 辆机器人数据。

工程机器人在设计过程中应用了大量现代设计方法，利用了标准零件库，麦迪三维设计工具，UG 同步建模等方法大大缩短了设计时间，并且让整个项目更加灵活，能够快速对结构进行调整。

完成工程机器人加工也同样离不开现代加工方法，激光切割和 3D 打印技术可以快速实现机器人部分机构验证，数控加工技术保证了零件加工的准确性，大部分加工过程实现了无纸化，借助云加工平台让交付期缩短很多，留出了更多的时间进行测试和模块迭代。

虽然经受住了比赛的考验，但也存在一定的不足之处，整车设计过程中没有过多考虑电控布线问题，对后期线路布置造成了一定影响。升降机构和夹取部分设计也过于传统，没有实现一次对位多个弹药箱抓取的功能。还有有些部分设计不够轻巧，整车质量达到了 37.5 kg，接近规则极限要求。

展望未来，工程机器人的设计将会实现更多功能，在材料和结构上取得更多突破，能够实现更快的对位和动作执行。

## 参考文献

DAWSON M, PING W, WILLIAMS K 2018. The Role of CAE-CDE in Cybersecurity Education for Workforce Development.

TLALE N, VILLIERS M D 2009. Kinematics and Dynamics Modelling of a Mecanum Wheeled Mobile Platform [C] //; City.

陈建军, 陈勇, 高伟, et al. 2001. 平面四杆机构运动精度可靠性分析与数字仿真. 西安电子科技大学学报 [J], 28: 759-764.

陈万米 2010. 中国机器人大赛及其机器人技术发展. 电子制作 [J]: 30-34.

程永奇, 张贵成, 孙友松, et al. 2010. 基于 UG 的传动机构有限元分析方法研究. 机械工程师 [J], 37: 40-43.

郭策, 成慧 2009. 中山大学 ABU Robocon 国内机器人大赛技术总结. 机器人技术与应用 [J]: 83-85.

李维荣, 朱家诚 2003. 螺纹紧固件防松技术探讨. 机电产品开发与创新 [J]: 15-17.

刘革菊, 董立新 2012. 交流永磁同步无刷伺服电机的选型. 机械管理开发 [J]: 109-111.

刘瑞, 蒋蓁, 机电工程 雷 J 2010. 小型机载云台结构设计和分析. 27: 5-7.

南洪尧 2018. 玻璃纤维/环氧树脂复合材料力学性能研究 [M]. 太原理工大学.

卿慧玲, 蔡自兴 2004. 移动机器人激光雷达数据的三维可视化方法. 吉林大学学报 [J], 22: 411-414.

檀润华, 赵凡 1998. 汽车减震器新型数学模型的研究. 汽车工程 [J]: 113-117.

王旭 2019. 全国大学生机器人大赛发展历程 机器人技术与应用 [J]: 26-28.

徐志刚, 王昊, 王军义, et al. 2014. 空间机器人悬挂系统重力补偿研究. 机械设计与制造 [J]: 149-152.

严红 2011. V 形块定位误差计算的通用公式及其应用. 湖南工业职业技术学院学报 [J], 11: 3-4.

郁大鹏 2017. CAN 总线电机的控制及其在机器人竞赛中的应用. 中国信息技术教育 [J]: 60-64.

张泽东, 马创创, 刘东强 2019. 基于 ROBOMASTER 比赛补给站的球滚动筛选分析 机械研究与应用 [J], 32: 215-216+222.

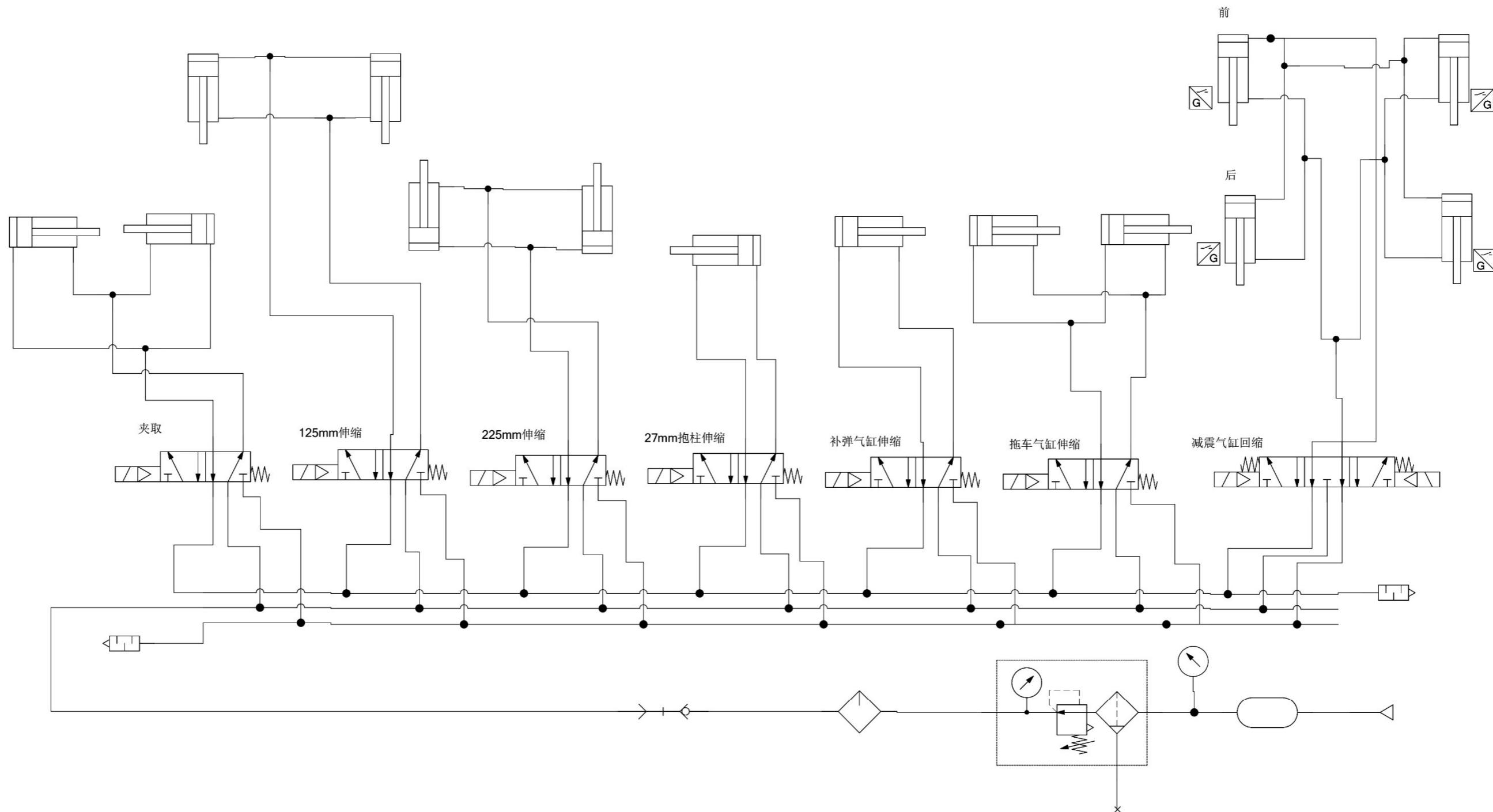
郑仁辉 2017. 麦克纳姆轮全向机器人移动平台的设计 [M]. 哈尔滨工程大学.

周华 2011. 单纵臂式悬架主体结构形式的研究. 装备制造技术 [J]: 14-16.

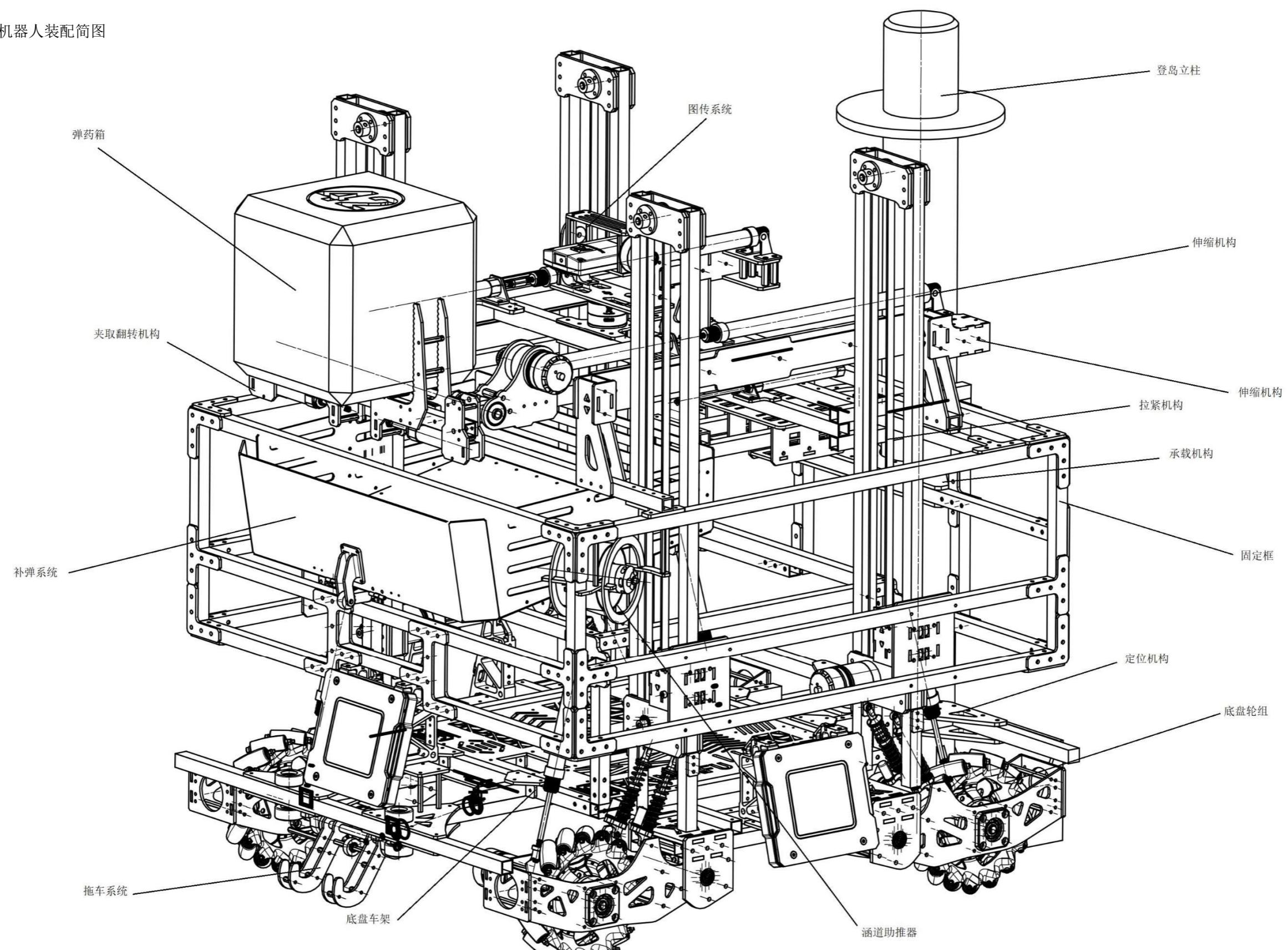
庄工 1989. 同步带传动的设计计算和使用. 机械制造 [J]: 9-12.

## 附录

附录 1 工程机器人气动原理图



附录 2 工程机器人装配简图



## 致 谢

感谢我的母校西北农林科技大学，能来到这里学习应该是一生中最幸运的事情，学校为我提供了一个广阔的平台来历练自己，这是世界上最好的大学。

完成本次毕业设计非常感谢我的指导老师，侯俊才老师总是能想的很周到，在我做新的事情之前，能给我准确而细致的引导，让我少走了太多弯路。他对学术很严谨，具有科研工作者应该有的态度，今后的学术生涯我也会这样砥砺前行。

感谢 abo studio 深圳市布老湿科技有限公司，为我的毕业设计提供了启动资金，依靠这笔资金完成了第一代机器人。

感谢大疆创新提供了这个比赛平台，让我结识了一群怀揣梦想的青年工程师，和他们的交流中我得到了太多的启发。

感谢西北农林科技大学猎隼队的队员们，因为他们的帮助和肯定我完成了工程机器人的设计，我不会忘记一同奋斗的日日夜夜。

感谢 Robomaster 西安联盟的同学们，为我的设计提供了技术和物资的支持，作为联盟的一员我非常荣幸。

感谢同济大学的陈雨宇学长，从他的设计中我得到了最初的灵感。

2019 年 6 月于杨凌