



Using a R2-M6 motor driver chip and Field-Oriented Control (FOC), the RoboMaster G300 Brushless DC Motor Speed Controller enables precise control over motor torque.

Exclusively designed for the RoboMaster G300 19V Brushless DC Motor and G300 Brushless DC Motor Speed Controller, the G300 Assembly Kit includes screws, cables and a terminal board.

Refer to System Specification Manual, RoboMaster User Manual, Introduction of RoboMaster Modules

Up to 10000 Assembly Kit includes several cables and a terminal board, complete assembly system offers by our RoboMaster System.

# ROBOMASTER 高校单项赛

## 赛季总结

哈尔滨工业大学（深圳） 南工骁鹰战队

编制

2022 年 9 月 发布



# 目录

<b>1. 规则技术点复盘 .....</b>	<b>2</b>
1.1 规则技术点分析回顾 .....	2
1.2 实际实现技术点 .....	2
1.3 异同原因分析 .....	3
1.4 解决方法分析和经验总结 .....	3
<b>2. 技术方案复盘 .....</b>	<b>4</b>
2.1 机械结构方案 .....	4
2.1.1 腿部结构方案 .....	4
2.1.2 云台结构方案 .....	7
2.1.3 迭代情况 .....	7
2.2 硬件方案 .....	8
2.2.1 硬件框图 .....	8
2.2.2 单板硬件说明 .....	8
2.2.3 重要传感器选型 .....	10
2.3 软件方案 .....	10
2.4 算法方案 .....	11
2.4.1 控制算法方案 .....	11
2.4.2 击打能量机关算法方案 .....	11
2.5 测试方案 .....	11
<b>3. 项目进度复盘 .....</b>	<b>13</b>
<b>4. 赛季人力安排复盘 .....</b>	<b>14</b>
4.1 团队架构 .....	14
4.2 团队建设情况 .....	15
<b>5. 预算复盘 .....</b>	<b>16</b>
<b>6. 技术方案参考文献 .....</b>	<b>17</b>
<b>附录 学术创新成果 .....</b>	<b>18</b>

# 1. 规则技术点复盘

## 1.1 规则技术点分析回顾

RMUT2022 步兵单项赛的挑战任务是从场地上的 A 点出发，依次占领 A、B、C、D 点后激活能量机关，其中从 A 点到 B 点需要经过一段  $15^\circ$  坡和一段  $13^\circ$  坡，规则没有限定机器人的运动轨迹，因此对于一般的双轮平衡步兵机器人，从 B 点到 C 点有两种路径可走，但是从 B 点运动到地图上的对角再经过两段  $13^\circ$  坡的时间显然会比从 B 点直接飞坡到 C 点的时间长，而对于具有轮腿机构、可以跳跃的机器人而言，如果能直接从飞坡缓冲区下方跳过台阶到达 C 点，就有可能大大缩短运行时间。因此**飞坡/跳台阶**方案应该会是大多数队伍选择的方案，在通过 C 点后机器人又要经过两段  $13^\circ$  坡才能到达 D 点。

由于目前赛场上还没有出现过平衡步兵，我们暂且无法得知坡道会对平衡底盘的平衡性产生多大影响，鉴于本次赛场上有许多坡道，我们预计在平衡状态下的**爬坡**将会对机器人运行时间产生很大的影响。

除此之外，**平衡步兵飞坡**也是一个很大的挑战，因此，**提高平衡底盘在各种地形下的稳定性**就应该是最重要的技术突破点。

通过分析规则，我们可以注意到，步兵单项赛平衡步兵组规则指向的技术点即：

- 平衡底盘飞坡
- 轮腿实现跳跃
- 在不同地形上的稳定性

由此，我们在赛季初决定以突破这几个规则技术点为目标，设计后续技术方案

## 1.2 实际实现技术点

在中期视频中，我们已经展现了平衡步兵的平移与旋转，轮腿跳跃上台阶和摔倒后自己站立的功能。即在寒假之前，基本实现了基础功能，原计划预计在春季学期实现不同地形稳定行走和飞坡。

但最终进度也停滞于此，未能实现稳定移动和飞坡功能，速度、射击能力等性能也有待提升，最终未完成 RMUT 平衡步兵组的中部分区赛。

截止至八月底，我们已完全实现飞坡、稳定运行等其他技术点，达到赛季初指定的要求。

## 1.3 异同原因分析

其中最大的原因是疫情造成的延期开学两个月余，完全在计划之外，极大地耽误了平衡步兵的研发任务进度，导致最终未达到上场要求。而在疫情返校后，实验室也受到诸多限制，导致主力队员不得不将更多的精力放到 RMUC 中至关重要的几个兵种中去，对于平衡步兵的关注也没有前期多。

此外，还有由于中期对于平衡步兵研发任务的监管与关注过少，导致在较长一段时间内，研发任务都得不到有效推进。人员安排并不合理，顾问能投入的时间有限，主要负责人又同属无人机下电控项目，导致职责划归不清晰，无法有效监管。

## 1.4 解决方法分析和经验总结

疫情的影响属于意料之外，极大地压缩了研发时间，无可避免。但相比其他兵种机器人的进度，由于平衡步兵属于战队第一次研发，没有现成的遗留产物，只能借助开源资料来辅助研发，故进度稍慢也可以理解。在本赛季之后，我们队伍的平衡步兵已有了一定的积淀，可以有效减少前期研发时间，像别的机器人一样在寒假前完成第一代车的基本功能并能稳定上场，有效避免因突发事件导致进度拖慢最终无法上场。

## 2. 技术方案复盘

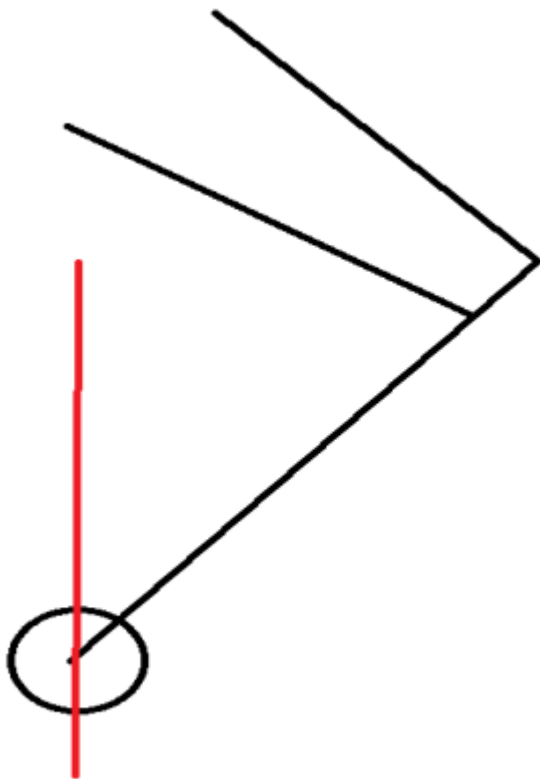
### 2.1 机械结构方案

机械结构设计方面参考了哈理工荣成校区 ARX 的机械设计，对轮轴部分进行了再设计，关节电机和驱动电机均采用了宇树 A1 电机作为驱动电机。

#### 2.1.1 腿部结构方案

腿部设计方面，由于缺少实现机器人跳跃动作的经验，我们首先参考了苏黎世理工大学的 Ascento 机器人和哈尔滨理工大学荣成校区 ARX 的三连杆机械设计。

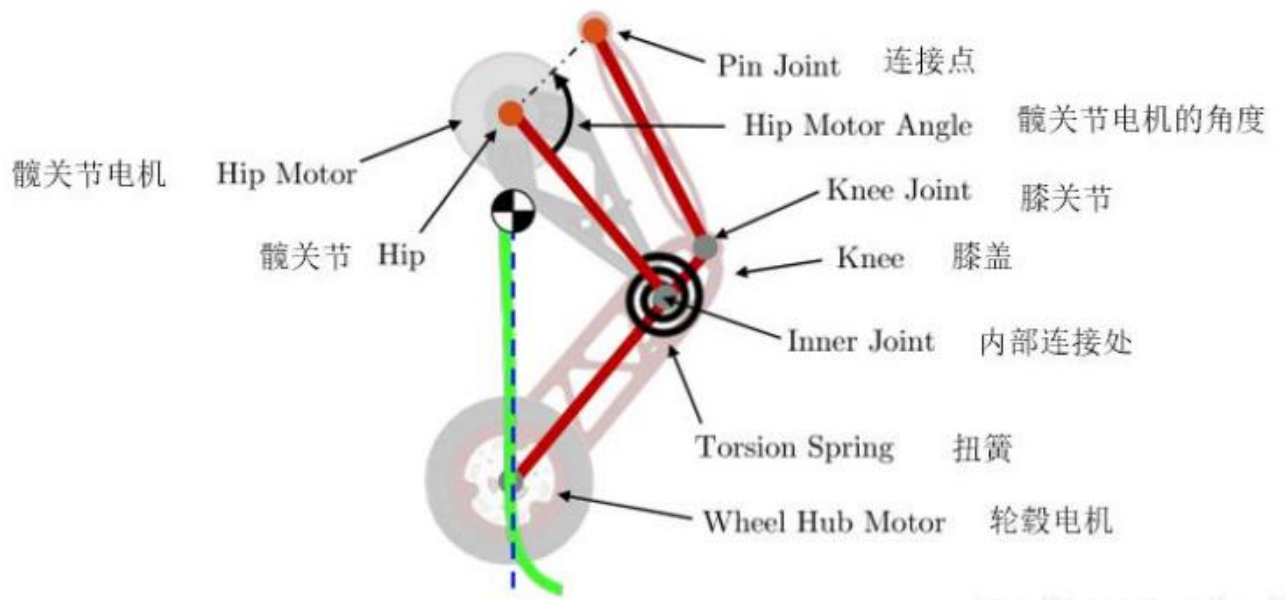
首先，由于三连杆系统的连续性非线性，连接轮子的端点轨迹会是一条非线性曲线，由于机构间的耦合，这会导致机器人在跳跃过程中发生身体旋转。为了避免这一情况，我们可以通过选取合适的尺寸比例，并在两端点处设计机械限位，使得轮子在跳跃过程中可以垂直于地面做近似线性运动。如下图所示，红色线段通过系统的质心，我们在尺寸设计中应尽可能使轮子的运动轨迹与该线段贴合。



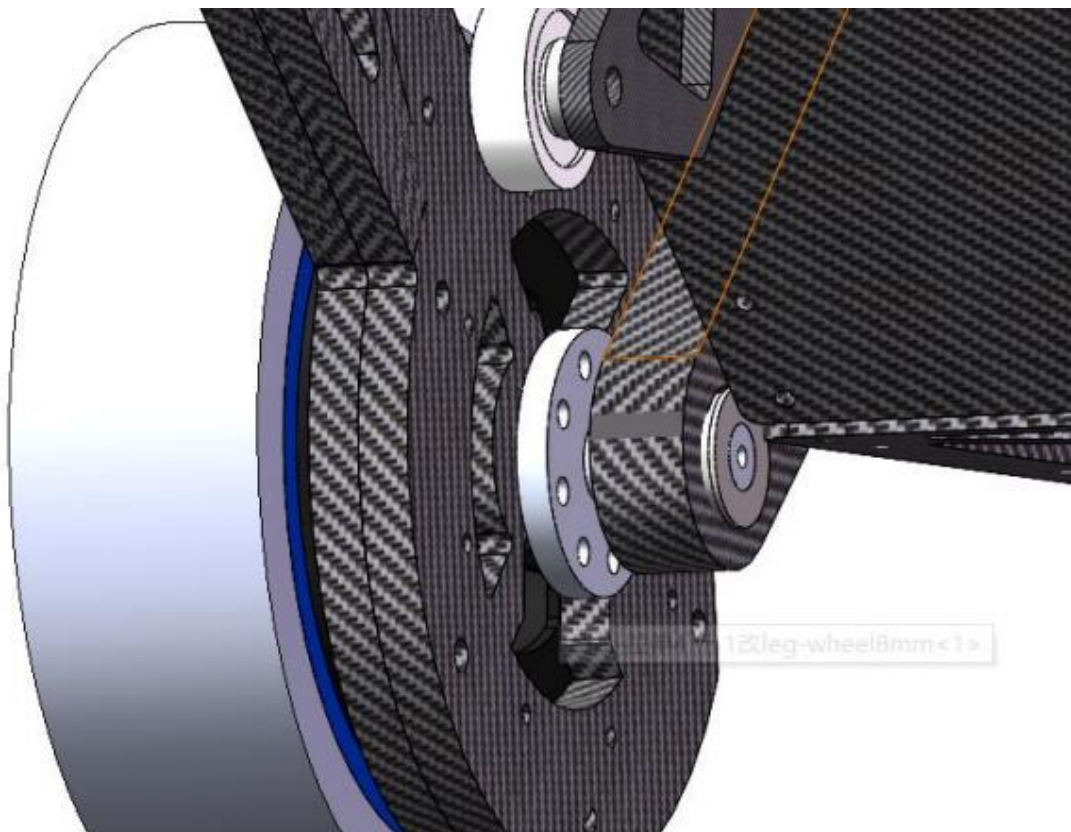
另外，根据 ARX 的仿真结论，在满足机器人跳跃所需的电机扭矩后，腿部伸展距离决定

了机器人的跳跃高度。所以在尺寸设计时，也要尽可能使腿部的伸展范围提升。腿部结构的尺寸设计过程我们将参照 ARX 的设计思路，按照确定比例→仿真→最终确定的方法，找到当前规则下三连杆结构跳跃的更优解。

底盘设计在腿部结构的膝关节连接处添加扭簧以获得起跳时的动力补偿，如下图所示。

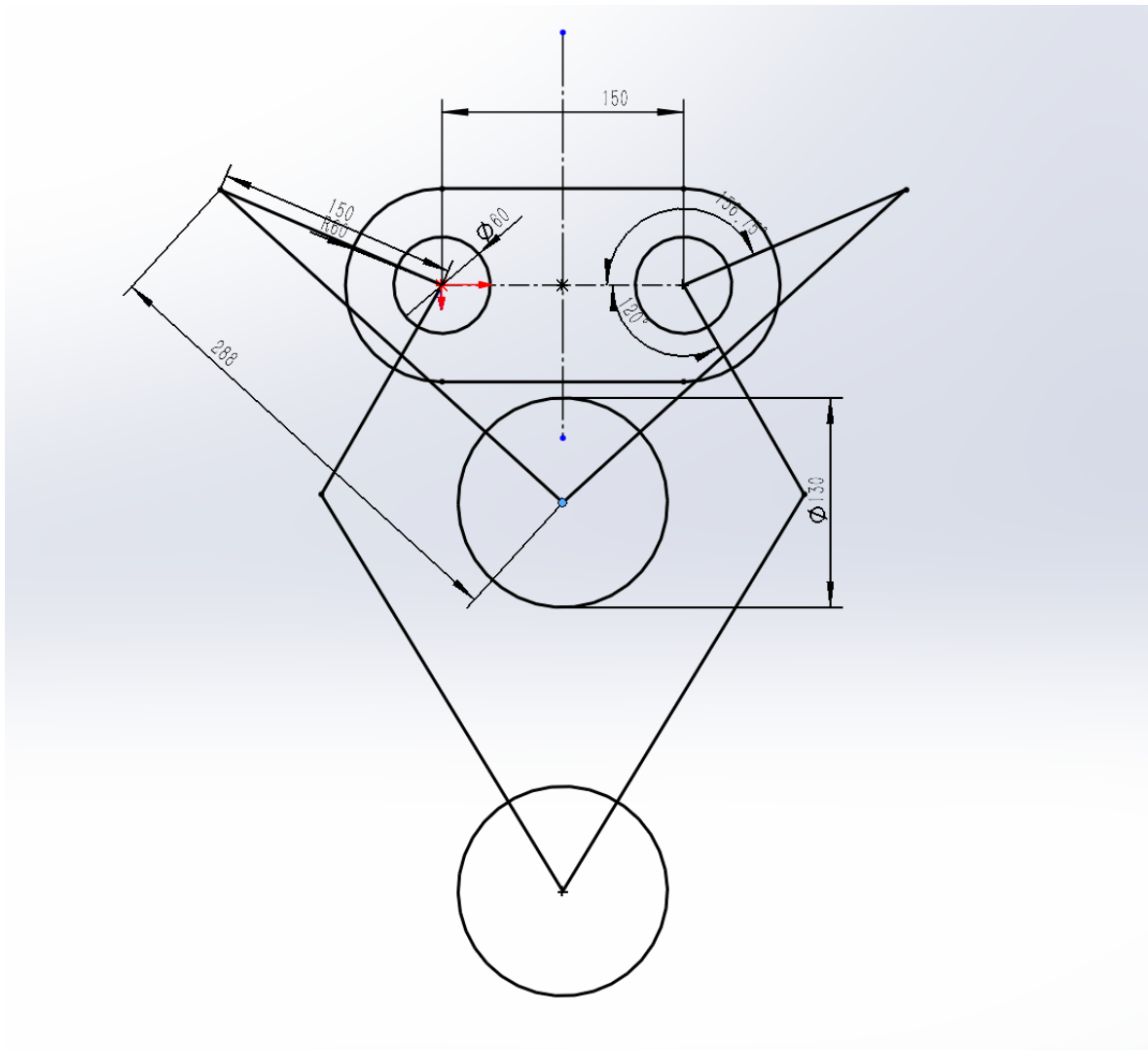


轮轴部分为了避免外八问题和横向尺寸的考虑，以及经济情况的考虑，选择了用两块 8mm 玻纤板来组成，其中一块扣在电机两边进行限位，同时也保证了一定强度。





但后续出于技术情况以及运动需求的考虑，三连杆的优化方案可能无法实现稳定跳跃 200mm 台阶，我们决定将借鉴 ARX 的四连杆四足机器人的腿部设计，并进行再设计。下面分析该结构的技术指标。由于四连杆的对称设计，相比于三连杆结构，可以省去对腿部运动执行跳跃轨迹时，因为连杆末端轨迹不通过系统质心导致的机体旋转这一问题的顾虑。相比于三连杆结构，四连杆结构实现了在同等高度限制下腿部伸展距离的翻倍，能保证满足 200mm 台阶跳跃的需求。



但由于采用了双电机，四连杆结构的机体体积和重量都明显大于三连杆，维护的成本也更高。后续在满足基本跳跃需求的前提下，我们进行了多次优化机体结构以达到减重目的。



### 2.1.2 云台结构方案

云台部分计划采用上供弹方案以减小对机体体积的限制，此外还将优化发射机构，将炮管的轴线上移，从而带髋关节电机，为腿部伸展提供更大的空间。

目前通过对多所高校队伍 开源资料以及本队上赛季方案的对比分析，目前着重测试拨珠螺丝或钢珠进行弹丸限位的方案。采用拨珠螺丝方案，在进行测试调试的时候便于调整限位间距、便于更换。同时，由于 末端钢球直径小，可保证弹丸通过限位后直接与摩擦轮接触，减小外部扰动带来的影响。具体效果有待进一步的实测分析。

云台其余部分，在上一代基础上进行设计优化，主要优化方向是减轻质量，减少转动惯量以提高响应速度。对于云台  $z$  轴增稳方案，采用平行四连杆结构，并增加电机驱动，补偿旋转起伏台处车身上下移动高度差。

### 2.1.3 迭代情况

初代设计存在的问题：

1. 轮腿结构尺寸较大，车身整体较重。
2. 目前设计的轮腿结构主要是为了跳跃 200mm 台阶，但由于其尺寸结构限制和电控调试进度问题，尚无法达到最初目的。
3. 驱动电机为宇树 A1，其最高转速为 21rad/s，无法满足最大移动速度的要求。
4. 上供弹云台设计导致重心较高，可能影响机器人的平衡稳定。
5. 由于重心设计问题和调试问题，目前无法实现原地静止。
6. 云台  $Z$  轴稳定方案仍在测试，当前无法实际运用。

最终我们采取基于轮腿方案进行迭代：

将轮腿方案的功能进行重新定位，从跳跃台阶改为作主动悬挂的作用，以应对场地上“无处不在”的起伏路段。

1.1 基于原本轮腿方案，缩短了轮腿的长度，优化结构，降低重量，调整整体的重心，使重心尽量靠近驱动轮轴线（所在竖直平面）。

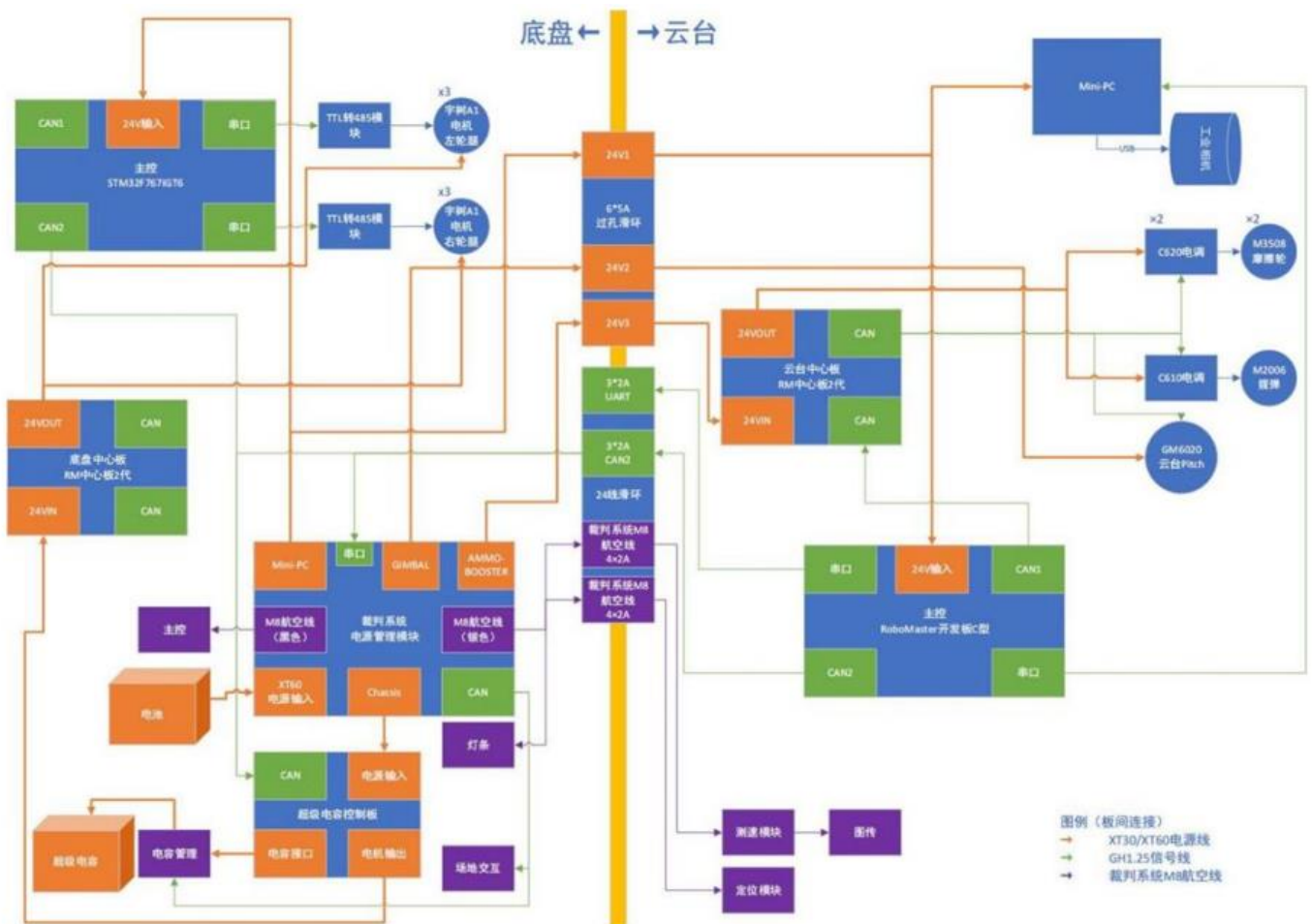
1.2 车身添加动量轮或者可滑动的配重块，辅助车体平衡。

1.3 云台采用 yaw 轴供弹结构以降低重心，因与悬挂功能有部分重合，故未采用 Z 轴稳定云台。

备注：由于云台主要由普通步兵移植，故迭代情况跟随普通步兵云台方案。

## 2.2 硬件方案

### 2.2.1 硬件框图

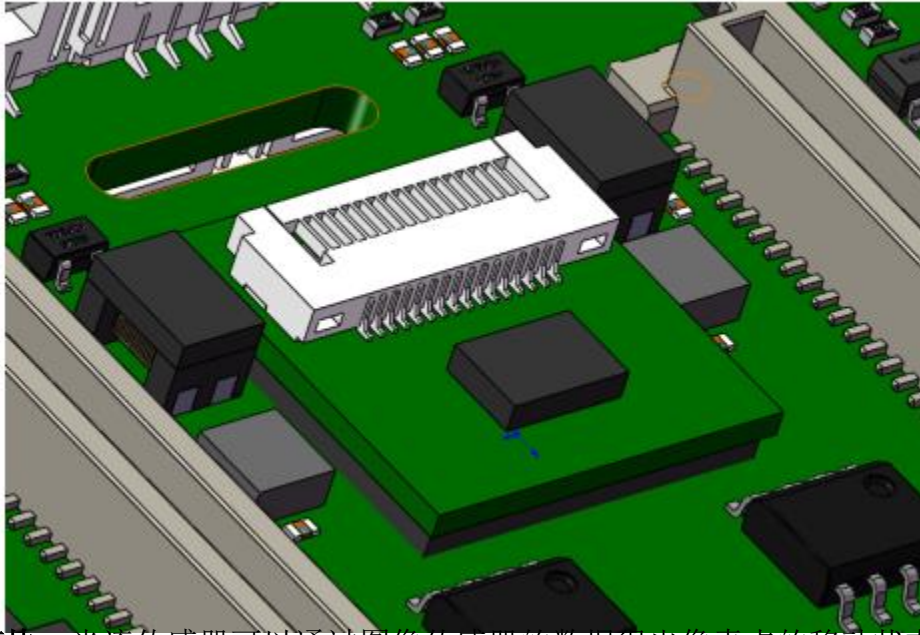


### 2.2.2 单板硬件说明

单板	设计需求	风险评估
ROBOMASTER 电调中心板	电调中心板是一款专为实现电源及 CAN 通信接口扩展的转接板。中心板具有结构紧凑、接口集成度高等特性,可同时提供 7 套动力系统的供电	几乎无风险
SPI 转 CAN 板	用于收集编码器信息,与主控板通信	几乎无风险
超级电容控制板	用于管理超级电容的充放电和升降压,与主控板通讯	超级电容过充引发起火风险,输出电压不稳定导致整车设备不安全的风险
超级电容板	用于集成超级电容组	超级电容过充导致起火的风险,超级电容串联不均压导致的个别电容超压的风险
USB 转 CAN	用于小电脑与主控板通信	几乎无风险
Jlink WIFI 调试板	用于无线调试,方便研发	几乎无风险
大风车扇叶板	用于模拟赛场上的大风车	扇叶旋转过程中引起的机械伤人
5V 转 3.3V 模拟信号转换板	用于工程机器人拉线传感器模拟信号的转换	几乎无风险
G4 主控板	主控板	几乎无风险
F7 主控板	主控板	几乎无风险
NX 载板	转接板	几乎无风险

### 2.2.3 重要传感器选型

**IMU:** 鉴于之前在其他机器人上采用的 RoboMaster C 型开发板 上的板载 bmi088 姿态传感器使用效果较好，平衡步兵机器人的云台部分的陀螺仪将继续沿用 C 板内置 bmi088 方案，同时，底盘主控板由于采用了正点原子 Apollo STM32F767 核心板+自制载板的方案，需要外接惯性测量单元，我们选择在 F7 载板上嵌入 bmi088 芯片用于底盘姿态测量。



**光流模块:** 光流传感器可以通过图像传感器的数据得出像素点的移动状态进而给出机器人的运动速度，空中机器人常采用光流传感器+Tof 距模块的方案来实现在室内的定点悬停，考虑到平衡底盘的自稳与无人机的定点悬停有一定的相似性，我们计划采用匿名科创的光流模块+激光测距方案，作为平衡底盘 IMU 姿态反馈和轮组电机编码器速度反馈的补充。



## 2.3 软件方案

控制框架:



最终方案中关节电机使用 A1，轮毂电机使用海泰 03。我们在原有的南工骁鹰步兵机器人软件框架的基础上加入对宇树 A1 电机的 STM32 驱动支持，通过 STM32F767 来实现与 A1 电机的通信，并采用 CAN 通信来实现 F7 开发板和 RoboMaster C 板的板间通信。

## 2.4 算法方案

### 2.4.1 控制算法方案

目前在平衡机器人控制领域应用较多的控制方案有 PID、LQR 和 MPC，其中 MPC 由于滚动优化的工作方式，对算力的要求较高，在嵌入式平台上不便使用，故暂不考虑；对于 PID 方案，我们在先前的技术验证中发现其效果并不够理想，且调参难度过大，要想实现更好的控制效果，就需要在调参方面花费更多精力，不利于推进研发进度；对于 LQR，我们经过仿真和实物验证后发现，在模型较为准确的情况下其控制效果远好于花费与 LQR 理论计算相同的时间来调参的 PID 控制器，但由于 LQR 只在初始时刻计算一次、严重依赖于模型及只适用于线性系统的特点，其在各种工况下的性能仍有待考量。经过比较，我们最终采用 LQR 方案作为平衡底盘的控制方案。

在云台方面，仍沿用普通步兵经典的双环 PID 方案，即速度环、位置环方案。

### 2.4.2 击打能量机关算法方案

步兵竞速单项赛时，有击打能量机关的任务，基于此我们采用 EKF 扩展卡尔曼滤波进行相位计算，使用时间和角度对初相位进行解算。使用 Python 生成噪音并跟踪效果图。具体可见步兵技术报告，平衡步兵的云台设计与射击模块与普通步兵基本一致。但由于最终平衡步兵未投入实战使用，其方案在平衡底盘上的效果未可知。

## 2.5 测试方案

我们先用已测得的机器人物理参数进行仿真，在软件验证确定无误后我们进行实物调参。由于我们的实验室场地相对来说较为充裕，可以有效测试平衡底盘的各项性能。目前已完成的测试情况有：

- 平地自稳
- 摔倒后站立

- 爬坡
- 飞坡路段
- 起伏路段
- 200mm 台阶

测试内容	完成情况
平地自稳	在保持平衡的情况下, 5min 内位置漂移不超过 0.5m
爬坡	能够在功率限制下爬上 $13^{\circ}$ 坡和 $17^{\circ}$ 坡
跳跃	能够借助轮腿跳跃 200mm 台阶
起伏路段	能在起伏路段上稳定移动并不影响云台性能
飞坡路段	能够正常飞坡

### 3. 项目进度复盘

日期	进度安排
10 月内	第一代平衡底盘设计完成，零件发加工并完成整车装配
10 月末-12 月末	完成相关技术验证及平衡底盘自平衡参数调试
1 月中上旬	底盘基础功能和跳跃功能调试与测试
寒假	至 4.20 日返校，23 日可进入实验室
4 月底至 6 月初	平衡步兵暂无进度推进
6 月中下旬至 7 月	完成云台装配并进行整车维护和调试
7 月-8 月末	完成底盘稳定行走，在各个路段上进行测试，完成飞坡功能，对云台各项功能进行调试与测试。
9 月中上旬	完成所有参数调试并维护整车



## 4. 赛季人力安排复盘

### 4.1 团队架构

角色	职责职能描述	人员要求	人数
机械负责人	负责平衡步兵的机械设计部分	要求大二及以上，有机械设计基础，对平衡步兵有所了解且感兴趣，并对目前开源的平衡步兵图纸较为了解，最好是有比赛的经验正式队员	1 人
嵌入式负责人	负责平衡步兵软件和算法部分的整体方案设计，硬件部分的设计、接线以及测试与调试	要求大二及以上具有软件设计、算法设计能力、硬件设计能力，能独立完成控制方案设计与执行，最好是有比赛经验的正式队员	1-2 人
视觉负责人	负责平衡步兵自瞄击打能量机关的整体方案设计以及测试与调试	要求大二及以上，超过一年视觉组工作经验，较强的代码架构能力，最好是有比赛经验的正式队员	1 人
测试组成员	设计并测试不同方案的准确度和可行性，并对数据进行分析从而指出机器人优化方向建议	要求有创新思维，记录数据严谨且细心；且有独立提出、设计和实现测试方案的能力	2 人
运营组成员	记录并参与平衡步兵的设计、加工、装配、测试等过程，采集素材	积极与人沟通，了解平衡步兵相关规则要求与机器人制作规范	0-1 人

## 4.2 团队建设情况

营造愉快的工作氛围，是搞好团队建设的基础。愉快和谐的工作环境使每个成员在战队中不但干得好，还干得开心，从而不断增强凝聚力。战队平时组织成员打球，爬山，团建等集体活动，既可以增进队员之间的感情，也可以放松他们的压力。

为了加强团队凝聚力、带动队员的积极性，我们在备赛过程中准备的一些团建活动，用于调动队员的活力，也能让长期处于紧张状态的队员们有一个放松、愉悦的快乐时刻，都取得了较好的成果，使得团队成员之间关系更加密切，工作更融洽，主要在两方面进行文化建设，取得了较好的成果。

### 1、节假日小团建

由于学业和战队的一些任务，也因为学校到家的遥远距离，很多队员在节假日并不能回家和家人一起度过。而我们会在这些特殊日子里举办一些小型团建，为这些“无家可归”的队员们带去一份快乐与温暖。也能够促进队员们的感情，增进团队的凝聚力。

### 2、大型团建

在每一个赛季，我们都会面临人员的更换和交替，团队不可避免的会出现新面孔，队员间也会有尴尬与陌生。而为了更好的让新队员融入，也让老队员快速熟悉新队员的面孔，我们也会在每个赛季组织一到两次的大型团建活动，这个赛季由于后期国赛时间待定，在校队员举行了几次大型团建，取得收益甚好。

## 5. 预算复盘

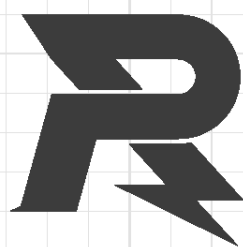
类目	子类目	预计开销	实际费用	说明
研发耗材	机械部件	4000	6000	版本迭代时由于设计结构问题重复发加工了一些耗材，略微超支
	硬件部件	18700	21460	除宇树 A1 电机外，购置了海泰 03 作为轮毂电机
	工具相关	2000	100	工具多为往届队员遗留，且算在 RMUC 公摊费用中，故算在单项赛中开销较小
比赛差旅	餐饮住宿以及租车费用	6000	0	未参赛
其他				

## 6. 技术方案参考文献

参考文献	收获点分析
赵磊. 两轮平衡车建模与系统设计. 西南交通大学. 2013	基本了解两轮平衡车的几种机械结构类型，对机械设计选型时有很大帮助
李作庆. 两轮自平衡机器人控制系统研究与设计. 哈尔滨工业大学. 2009	控制方案的大体框架来源
陆军. 基于 PID 和 LQR 控制的两轮自平衡小车研究. 西南交通大学. 2012	对于底盘控制算法的调试与改进有很大帮助
潘希祥, 徐坤, 王耀, 丁希仑. 具有悬挂系统的轮腿式机器人设计与分析. 机器人, 2018, 40(3):309-320	对轮腿关节的建模有了一定的了解，此外，此文在轮腿式机器人的悬挂问题上也具有启发意义
哈尔滨理工大学荣成校区 SPARK 战队. Robomaster2021 平衡步兵机器人机械技术综合说明文档. 2021	腿部结构设计方案
Ascento: A Two-Wheeled Jumping Robot	腿部结构优化方案
韩婵, 杨凌宇, 张晶. 面向重心变化的预估模型参考自适应控制器设计 [C]// Chinese Control Conference. 2013.	在平衡底盘重心自适应功能的开发方面有一定的借鉴意义
Klemm V, Morra A, Salzmann C, et al. Ascento: A Two-Wheeled Jumping Robot[J]. 2020.	在轮腿式机器人的控制特别是跳跃控制方面具有很大的启发意义
张晶, 申功璋, 杨凌宇. 面向重心变化的自适应飞行控制系统设计 [C]// 中国航空学会. 中国航空学会, 2010.	在平衡底盘重心自适应功能的开发方面有一定的借鉴意义

## 附录 学术创新成果

内容	性质	是否发布
视觉 Com 通信模块	技术文档	未发布
弹速	定量数据	未发布
2022 电控框架说明（C 语言版）	技术文档	未发布
框架 FreeRTOS	技术文档	未发布
框架初始化流程与层级结构	说明文档	未发布
Location_alarm 说明文档	说明文档	未发布



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镇茶光路1089号集成电路设计应用产业园2楼202