



Using a BL-HS motor driver cable and field-oriented control (FOC), the RoboMaster G300 Brushless DC Motor Speed Controller enables precise control over motor torque.

Exclusively designed for the RoboMaster M3000 PMS Brushless DC Gear Motor and G300 Brushless DC Motor Speed Controller, the U3000 Assembly Kit includes several cables and a terminal board.

RoboMaster System Specification Manual, RoboMaster System User Manual, Introduction of RoboMaster System Models

The M3000 Assembly Kit includes several cables and a terminal board, enabling a complete assembly system driven by four independent systems.

ROBOMASTER

机甲大师超级对抗赛

技术方案

中国石油大学（北京）SPR 编制

2023 年 4 月 发布

前言

本成本报告由中国石油大学（北京）SPR 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	潘伟骁	/
硬件	/	/
软件	杨腾	何清华
算法	张苏杭	/
其他	/	/

目录

前言	2
1. 平衡步兵机器人	4
1.1 机器人核心参数	4
1.2 设计方案	4
1.2.1 机械结构设计	4
1.2.2 硬件设计	7
1.2.3 软件设计	8
1.2.4 算法设计	9
1.3 研发迭代过程	11
1.3.1 测试记录	11
1.3.2 重点问题解决记录	11
1.4 团队成员贡献	12

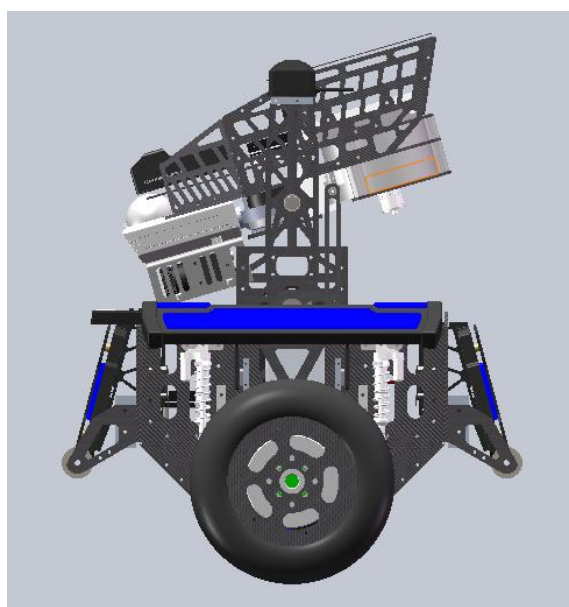
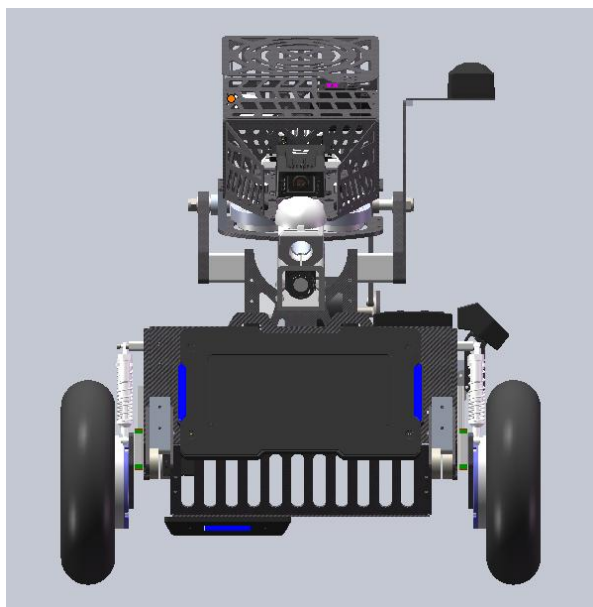
1. 平衡步兵机器人

1.1 机器人核心参数

名称	参数
重量（含裁判系统）	15kg
尺寸（长 x 宽 x 高/mm）	500x500x543
车体最大移动速度	3m/s
爬坡通过角度	18°

1.2 设计方案

1.2.1 机械结构设计



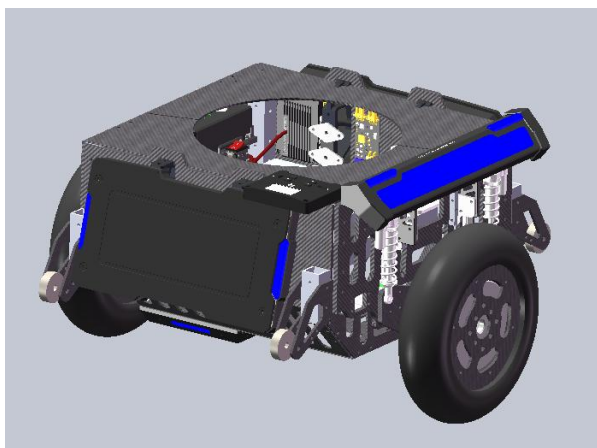
平衡步兵机器人整体结构三维图如下：

平衡步兵机器人的整体机械结构设计主要分为三个部分：轮组悬挂设计、底盘整体结构设计、云台及发射机构设计。

（1）轮组悬挂设计

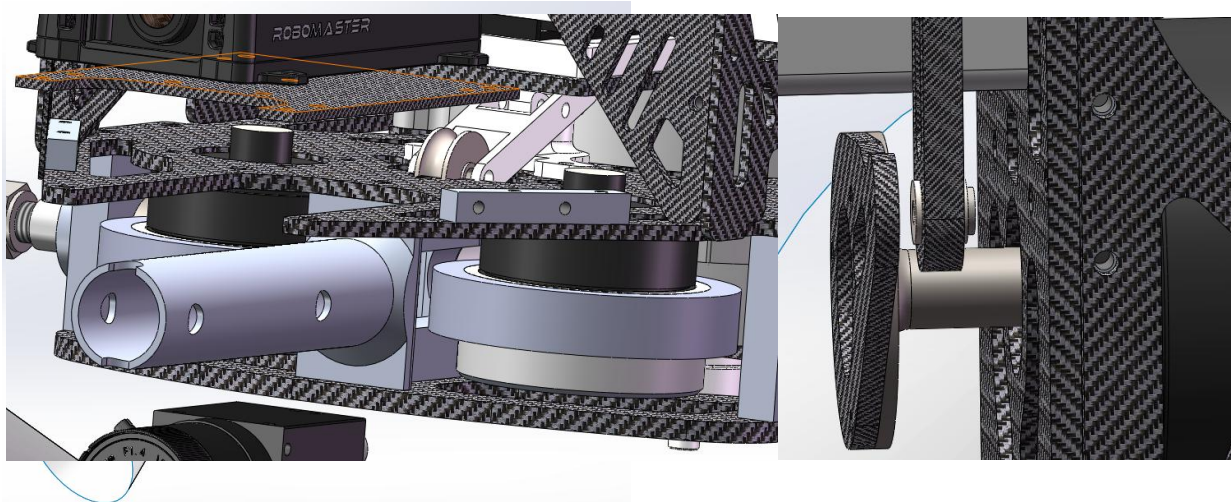
平衡步兵机器人

（2）底盘整体结构设计



平衡步兵机器人的底盘整体结构设计，主要包括底盘框架设计、布线设计和 yaw 轴机构设计。

（3）云台及发射机构设计



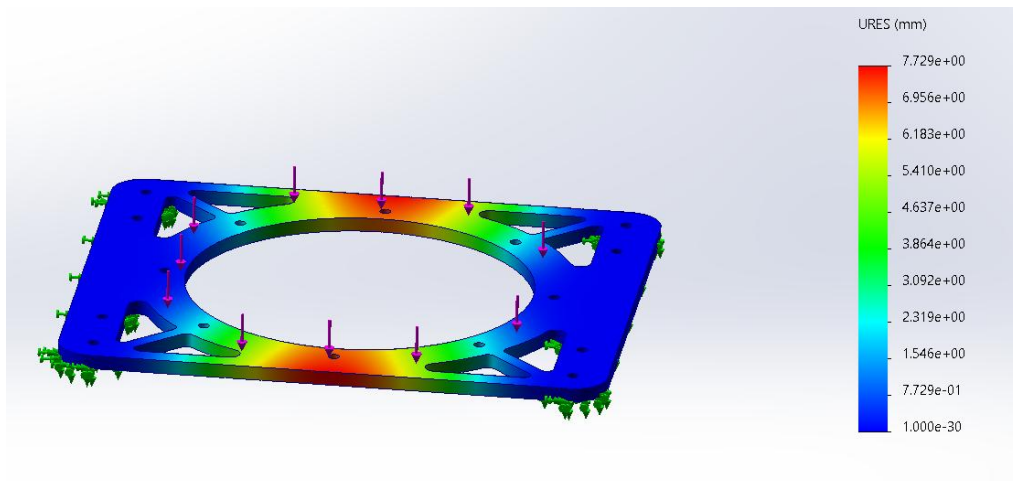
平衡步兵机器人的云台部分沿用我们队的步兵机器人的云台，在此基础上对云台架部分进行了修改，对摄像头的固定进行了修改，保证了云台 $-30^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 的俯仰角；发射机构上使用传统的枪管预置方案，测试效果较好，可以实现 10m 弹道散布一块小装甲板的精度，满足比赛对平衡步兵机器人的需求；pitch 轴连杆部分进行了优化，改为两个法兰轴承的固定方案，避免了推力轴承导致的阻力。

核心零件的有限元分析、静力学分析

对于平衡步兵机器人，受力较大的元件主要包括云台 yaw 轴安装板和云台侧板。对于这些受力较大的关键零部件，需要通过有限元分析和静应力分析来保证结构强度满足比赛对抗强度需求，同时通过分析可以找到结构强度过剩的地方，从而针对性的进行减重，尽可能多的减小机器人的重量。对具体零件的有限元分析如下：

（1）云台 yaw 轴安装板

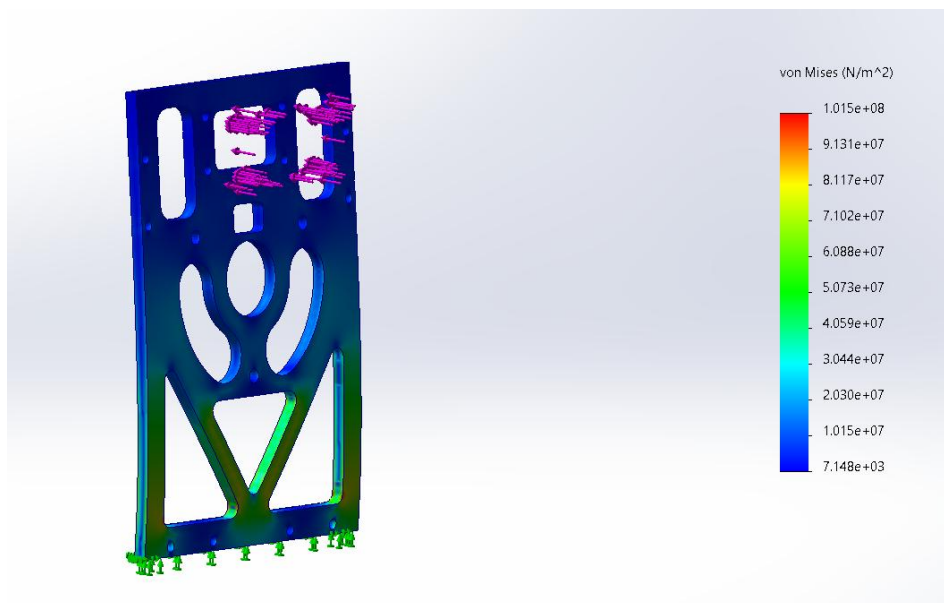
对于云台 yaw 轴安装板，主要承受整个云台的重量（约 5kg），因此对云台 yaw 轴安装板施加 50N 的垂直方向的力，结果如下：



可以看出虽然应力较大，但是没有发生明显形变，后续可以在两侧应力较大处增加支撑或固定结构，以减小板材应力。

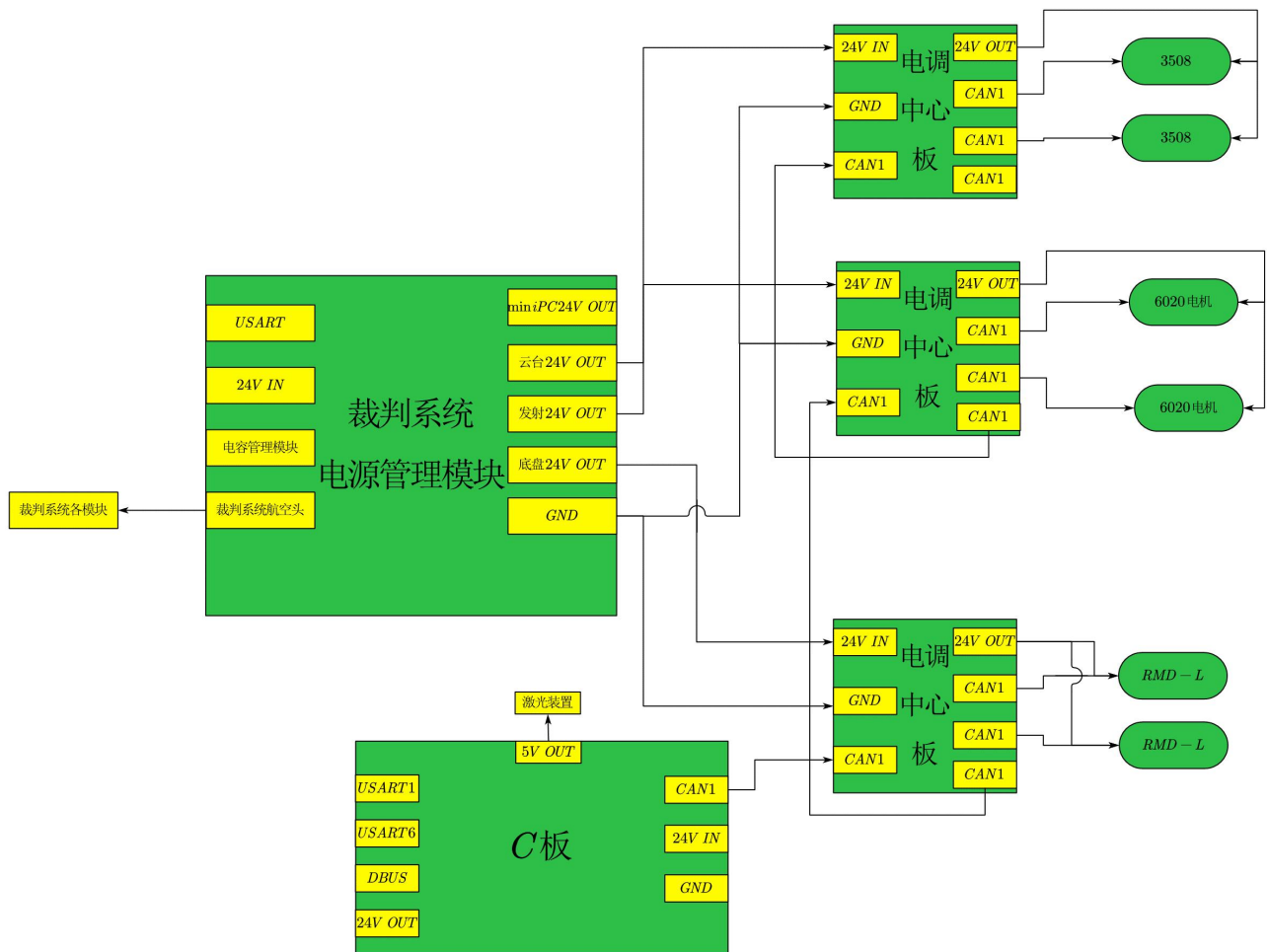
（2）云台侧板

云台侧板主要用来承载云台，由于云台重量较小，因此常规状况下受力较小。这里主要考虑极端状况下如被大弹丸击打、翻车等情况，此时云台侧板会受到一个侧向力，即垂直板面的力，对其进行静应力分析如下：

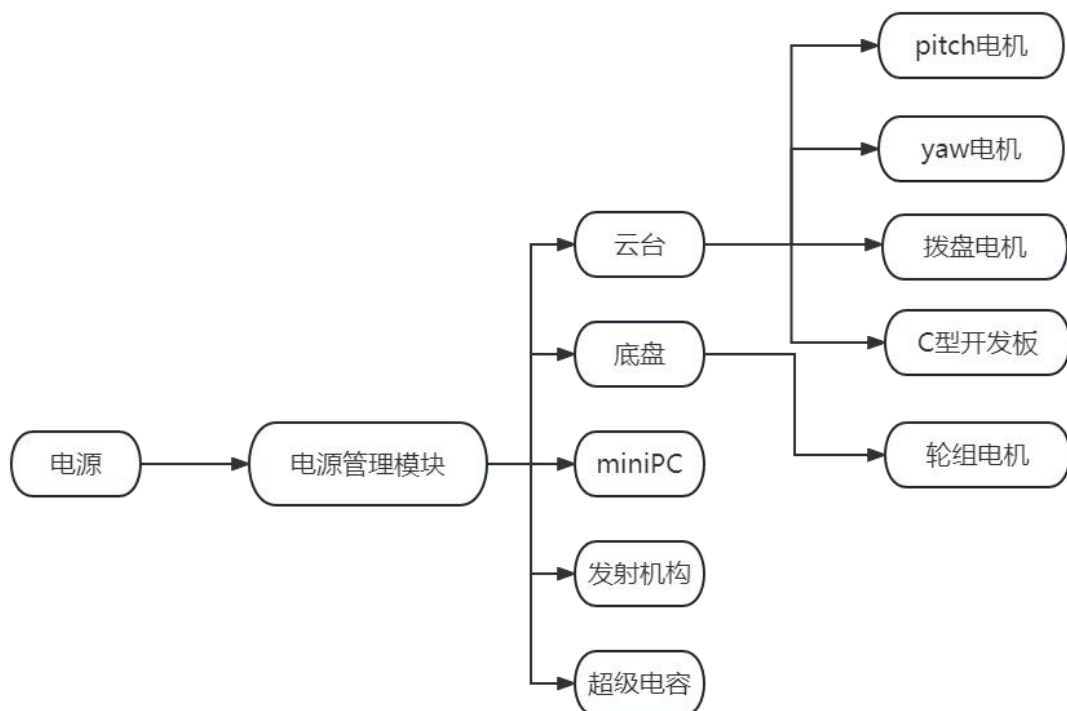


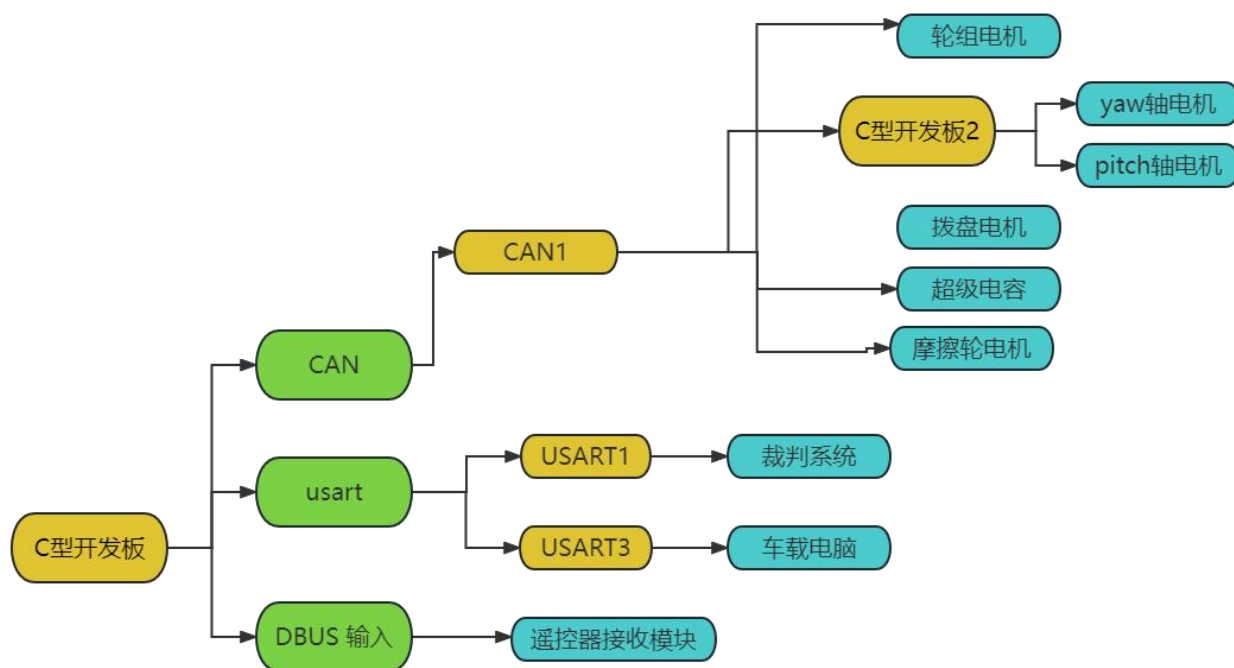
可以看出板材的形变在一定范围内，且应力分布集中在下侧，可以满足云台的强度需求。

1.2.2 硬件设计



硬件拓扑图





信号流图

1.2.3 软件设计

平衡步兵机器人底层代码使用基于 Cortex-M4 内核的开源操作系统 FreeRTOS，在大疆 RoboMaster 开发板 C 板上实现多任务框架，保证底盘云台等任务并发执行。使用 HAL 库对机器人操作编程，同时使用 Jlink 配套的 JScope 调试以及 Keil 的 debug 调试进行仿真参数调试，以实现机器人运动 and 目标的拟合。

平衡步兵机器人底盘使用 RMD-L 电机，采用扭矩控制的方法，接收 LQR 算法和转向 PD 控制输出的扭矩之和，实现平衡、前进、旋转的功能。LQR 算法以状态空间方程模型为基础，设置 Q 矩阵和 R 矩阵控制各个参量在代价函数中的权重，当使代价函数最小时，得到反馈矩阵的参数，实现最优控制。平衡步兵转向采用串级 PID 控制，外环为期望云台和底盘的相对角度，内环是期望角速度。在参数整定过程中，先对速度内环进行整定，实现电机对目标值的快反应、低误差，然后再整定角度外环参数，实现转向时对角度和速度的两个参量的控制。最终实现底盘保持平衡的同时跟随云台旋转，且误差小，响应快。

平衡步兵机器人云台控制采用串级 PID 的算法，通过角度和速度双环调整，以角度控制器的输出作为速度控制器的输入，以速度控制器的输出作为电流值的输入，从而实现角度控制目标。平衡步兵机器人发射机构摩擦轮采用速度环 PID，由于一、二、三级步兵机器人性能的不同，摩擦轮参数和速度设定也有所差异，从而实现子弹射出速度由慢到快，精准度由低到高的变化。

平衡步兵机器人控制中当底盘被墙卡住时，由于平衡控制向前运动需要先向后运动从而获取向前的加速度，导致机器人无法挣脱，因此在这种情况下不对机器人平衡进行控制，而是进行速度 PID 闭环，让机器人离开墙角后再进行平衡控制。

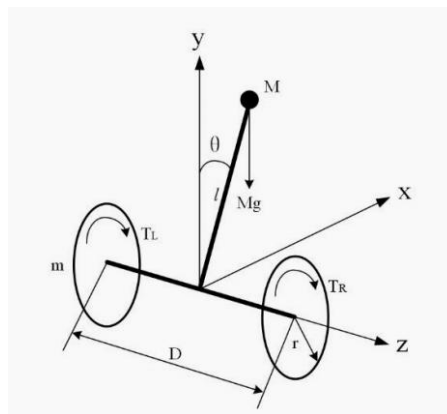
1.2.4 算法设计

1. 平衡控制

1.1 系统建模

对于机器人的动力学模型建模，作出以下假设：①机体质量等效成一个质心。②忽略腿部连杆的质量和运动的影响。③驱动轮和地面无滑动。

基于以上假设，将轮腿双足机器人等效成双轮倒立摆模型。



双轮倒立摆模型

表 双轮倒立摆物理参数

参数符号	参数含义	参数单位
M	机体质量	kg
m	驱动轮质量	kg
l	机体质心与轮轴的距离	m
r	驱动轮半径	m
D	左右驱动轮之间的距离	m
g	重力加速度	m/s^2
θ	机体的俯仰角度	rad
T_L, T_R	左、右轮的驱动力矩	N
J_P	杆转动惯量	$kg \cdot m^2$
J_ω	驱动轮转动惯量	$kg \cdot m^2$
x_l, x_r	左右驱动轮位移	m

使用拉格朗日动力学分析法对系统进行建模，选取三个广义坐标： θ, x_l, x_r ，列写驱动轮和上部机体的动能和势能方程。

$$T_1 = \frac{1}{2} J_\omega \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} m \dot{x}^2$$

$$v_{px} = \dot{x} + l\dot{\theta} \cos \theta; v_{py} = -\dot{\theta} l \sin \theta$$

$$T_2 = \frac{1}{2} (J_p + m_p L^2) \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} m_p (v_{px}^2 + v_{py}^2)$$

$$V_2 = \frac{1}{2} mgl \cos \theta = \frac{1}{2} mgL$$

根据拉格朗日动力学分析法列写以下方程：

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_k} = Q_k$$

使用 matlab 的 `functionalDerivative` 函数对拉格朗日方程进行求解，得到下式：

$$r \left(\frac{2J_\omega}{r^2} + M + 2m \right) \ddot{x} = (T_L + T_R) - Mr l \ddot{\theta}$$

$$(J_p + ML^2) \ddot{\theta} = MgL \sin \theta - ML \ddot{x} - (T_L + T_R)$$

1.2 状态空间方程

$$\dot{Z} = AZ + BU$$

$$Z = [x \ \dot{x} \ \theta \ \dot{\theta}]^T$$

2.LQR 控制器设计

首先对状态空间方程进行可控性和可测性分析，验证系统可控可测，可以进行控制。

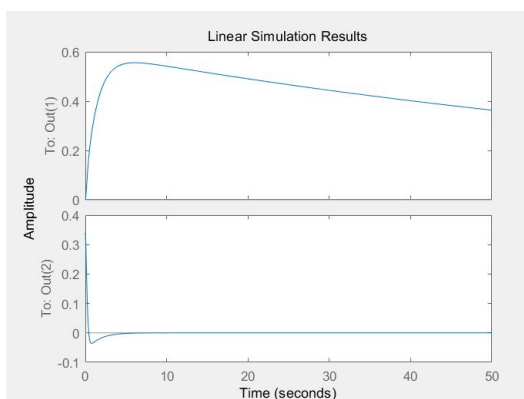
设置反馈矩阵：

$$K = \begin{pmatrix} K1 & K2 & K3 & K4 \\ K1 & K2 & K3 & K4 \end{pmatrix}$$

为使得系统极点配置最优，引入代价函数：

$$J = \int_0^\infty (y^T Q y + u^T R u) dt$$

使用 Matlab 求得状态反馈矩阵。经过仿真，发现能够满足机器人的平衡要求。



动力学仿真

3.转向控制

机器人转向采用相对角度控制，即底盘跟随云台转动。采用串级 PID 控制，将期望相对角度和实际相对角度的差作为外环输入，得到期望速度值输入给内环速度环，再得到扭矩值，并叠加到状态反馈矩阵计算得到的左右电机扭矩中。

1.3 研发迭代过程

1.3.1 测试记录

功能点	测试环境	测试设备	测试时间	测试结果
底盘平衡	实验室	平衡步兵机器人	2022.3.5	无干扰下实现平衡
发射机构	实验室	平衡步兵机器人	2022.3.10	实现稳定发射 500 发不卡
云台运动	实验室	平衡步兵机器人	2022.3.15	实现 pitch、yaw 轴稳定控制
底盘跟随	实验室	平衡步兵机器人	2022.3.15	实现底盘跟随云台方向
弹道精度	实验室	平衡步兵机器人	2022.3.20	十米小装甲命中率 95%

1.3.2 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	机器人版本号或阶段	解决人员
1	平衡步兵机器人以前倾姿态倒地且接触墙面时无法实现翻倒自救	没有考虑平衡步兵机器人与墙面接触时的摩擦力	增加前后纵向导轮，电控编写代码实现平衡前先后退远	V1.0	机械工程师：潘伟骁 嵌入式软件工程师：杨腾

序号	问题描述	问题产生原因	问题解决方案	机器人版本号或阶段	解决人员
			离墙面 效果：均可解决问题		
2	平衡步兵机器人发射小弹丸时存在漏发和连发现象	限位机构弹簧选择过软	换更硬的弹簧 效果：可以解决大多数情况下漏发多发问题，但仍存在颠簸路面下漏发弹丸	V1.1	机械工程师：潘伟骁

1.4 团队成员贡献

姓名	基本信息	主要负责工作内容描述	贡献度
潘伟骁	机器人工程、大三、机械部分负责人	负责整个机器人的机械结构设计，包括底盘轮腿设计、云台及发射机构设计，以及整个机器人的装配调试和实际测试	40%
杨腾	电子信息工程、大三、嵌入式开发部分负责人	负责机器人的控制系统，包括动力学建模、算法设计、仿真、参数的调试、整个机器人的运动逻辑	30%
张苏杭	机器人工程、大二、算法负责人	负责视觉系统，包括自瞄，击打能量机关	20%
何清华	机器人工程、大三、软件开发负责人	负责机器人的控制系统、代码编写	10%