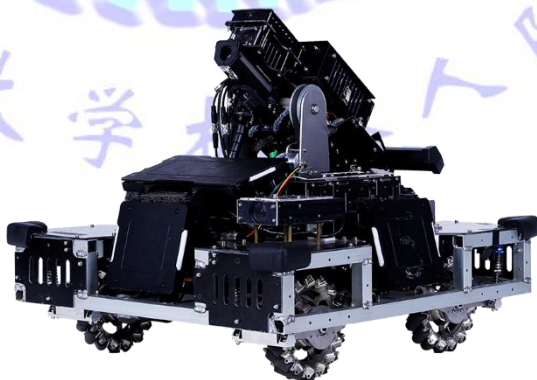




南昌大学 Passion 战队
Robomaster2019 赛季
步兵机器人开源技术文档

since 2006



目录

第一章 绪论	1
1.1 本文档来源及开源说明.....	1
1.2 设计要求.....	1
1.3 开源主要内容.....	1
第二章 总体方案	2
2.1 模块功能.....	2
2.2 设计要求.....	2
2.3 悬挂的选择及防撞.....	3
2.4 云台以及供弹方案.....	4
第三章 模块设计	5
3.1 底盘模块.....	5
3.2 发射模块.....	7
3.3 云台结构.....	9
第四章 应力计算	14
4.1 对云台关键结构应力分析.....	14
第五章 总结及展望	15
附录	16
一、卡弹问题分析.....	16
二、结构设计.....	24

第一章 绪论

1.1 本文档来源及开源说明

1、本开源文档为 Robomaster2019 赛季南昌大学步兵机器人机械结构开源，附属文件包含完整的技术文档、形态视频、三维装配图以及关键零件的二维图纸等；

2、本开源仅限于 Robomaster 参赛队之间技术交流，不得作任何商业用途。

3、未经作者允许，不得转载至任何公共空间

4、本作品的声明以及其修改权、保护作品完整权及最终解释权均归南昌大学机器人队 Passion 战队所有。

1.2 设计要求

本内容为步兵机器人的设计过程，在比赛中步兵机器人主要负责发射 17mm 小弹丸，击打对方机器人装甲板及基地装甲板，还有一个重要任务就是激活能量机关，为队伍带来攻击力和防御加成。

1.3 开源主要内容

1、底盘设计及新版轮系结构

2、拨盘分析过程及最终结构

3、云台 Pitch 轴计算及结构



第二章 总体方案

经过前期对比赛规则的分析，认为步兵在比赛中作为主要的火力输出，认为其灵活性和机动性在比赛中占重要地位，只有跑的快且打的准才能取得占住比赛的主动权。图 2-1 是步兵的各个模块。

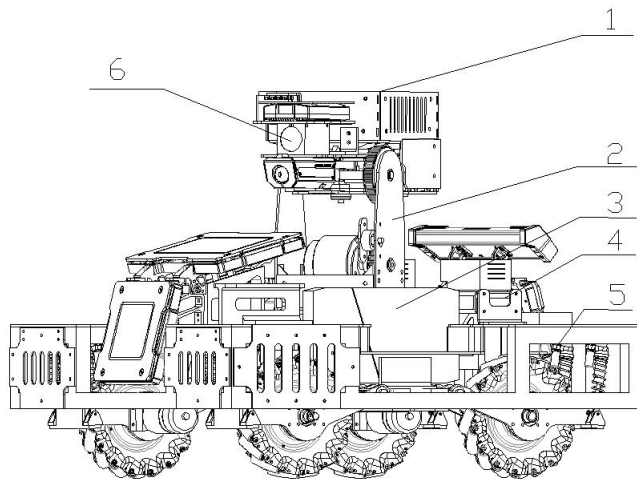


图 2-1 步兵机器人模块组成示意图

(1 为发射模块, 2 为云台模块, 3 为 MINIPC 模块, 4 为电池模块, 5 为底盘模块, 6 为摄像头模块)

2.1 模块功能

对步兵车各模块功能进行了总结，为后面设计提供方向，如图 2-2。

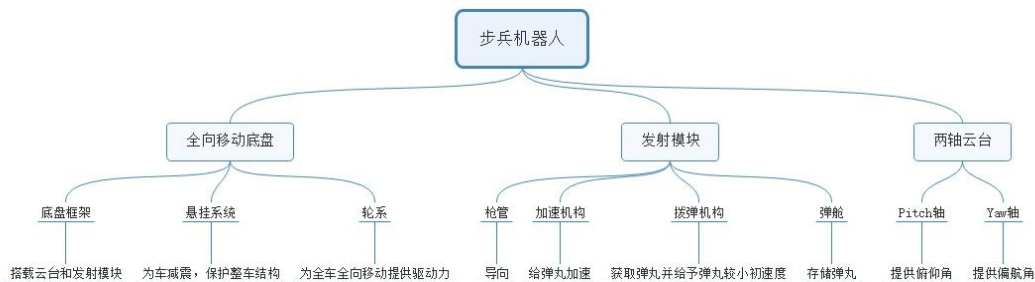


图 2-2 模块功能思维导图

2.2 设计要求

在比赛初期，我们为自己制定了一份设计要求，用来指导后期的设计，包括检验设计是否合格，部分数据是根据官方规则制定而来。

表 2-1 步兵机器人技术性能指标

分类	项目	性能指标	备注
总体要求	最大尺寸	600*600*500	长*宽*高 (mm)
	最大重量	23.7KG	
	最大射击频率	10HZ	
射击性能	单次发射		取 8 米处数据
	弹丸落点范围	120mm*120mm	
	连续发射		取 8 米处数据
云台性能	弹丸落点范围	150mm*150mm	
	最大俯仰角度	$\pm 45^\circ$	
	最大偏航角度	$\pm 90^\circ$	
运动性能	最高行驶速度	3m/s	平整路面测得
	最大爬坡角	17 度	平整斜坡测得
通过性能	凸起障碍最大高度	15mm	

2.3 悬挂的选择及防撞

由于横臂式悬挂（如图 2-3a）的与车体前进方向，车体在受到侧向冲击时，悬挂可以绕转轴旋转，同时能吸收更多的振动，受纵向冲击时，悬挂系统的铰接点承受扭矩；纵臂式悬挂（如图 2-3b）的转动轴垂直与车体前进方向，车体在受正向冲击时，悬挂可以绕转轴旋转，同时能吸收更多的振动，受侧向冲击时，悬挂系统的铰接点承受扭矩。步兵机器人在比赛过程中，如上坡对机器人的冲击载荷主要是朝向机器人正面，故考虑选用纵臂式悬挂作为机器人的悬挂。底盘框架我们采用了全包围结构，整体采用焊接，用壁厚较大的方管焊接成整体框架，主要是防止侧面冲击对铰链的损坏，且抗撞性能好，重心较稳，结构可靠（如图 2-4）。

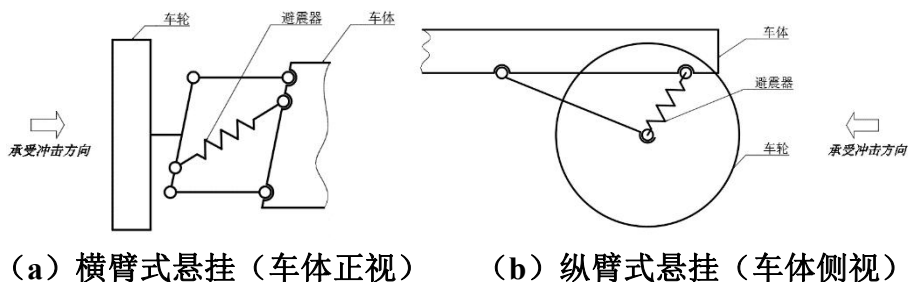


图 2-3 横臂式悬挂与纵臂式悬挂受冲击情况

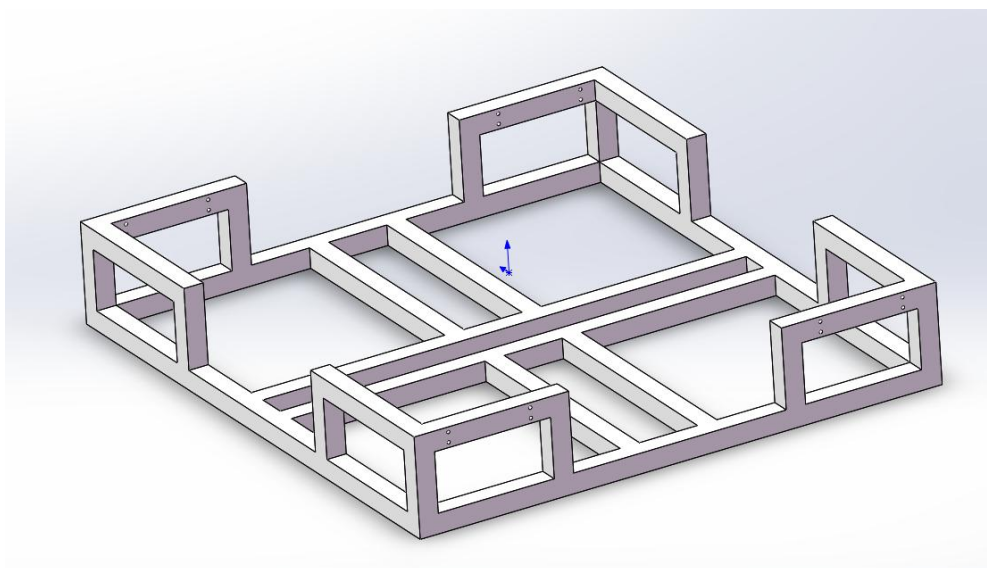


图 2-4 全包围式框架

2.4 云台以及供弹方案

我们对上供弹，下供弹进行分析，认为下供弹虽然可以减轻发射端的重量，减少 Pitch 轴的转动惯量，减轻 Pitch 轴电机的负载，但是由于供弹链路比较复杂，维修比较困难且占用底盘较大的空间，因此我们选择了上供弹的供弹方式，又为了减轻 Pitch 轴的负载，我们采用调整整个发射模块的重心并使用 1.5 传动比的带传动，选用同步带传动主要是因为同步带传动比准确，传动效率高，且不会产生很大的传动间隙。

第三章 模块设计

3.1 底盘模块

在 RM2019 赛季中,我们的底盘均采用的纵臂式悬挂,我们在寒假前做出了第一版步兵车 V1.0 (见图 3.1), 第一版步兵的悬挂很软, 安装电机的板子也只是用的玻纤板, 不敢用碳板, 觉得第一版用碳板实在有点浪费。但是第一版的底盘效果很差, 底盘很软, 轮子出现了严重的外八情况, 跑起来对麦轮的磨损特别严重, 外八也会导致传动效率低, 速度慢的问题。



图 3-1 步兵车 V1.0

看到第一版步兵底盘是这个样子的, 内心还是有点忧伤, 我们知道这种底盘是不可能上战场的, 果断重新进行轮系的设计, 我们分析出麦轮外八的原因主要是以下 2 点: ①固定轮系的合页 (第一版使用的是在某地买的合页) 出现一个侧向的相对转动 (见图 3.2), 这个转动是由于合页的间隙产生的; ②安装电机座的玻纤板刚度太小, 安装上避震器后整个安装板发生了较大的变形。

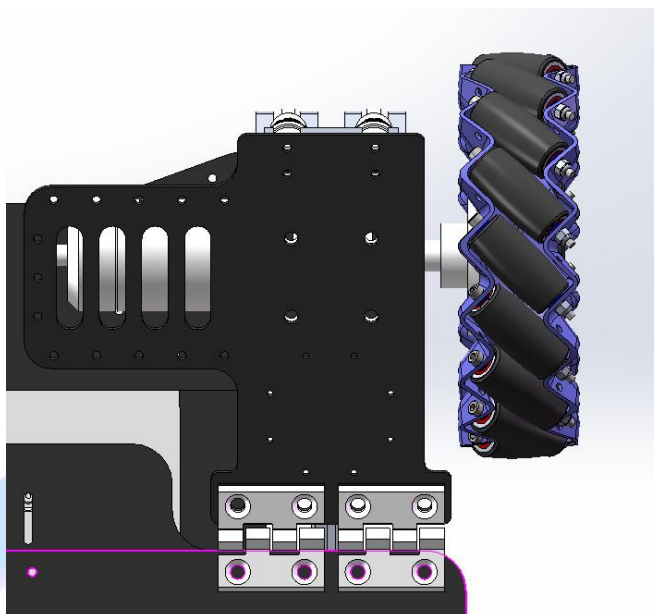


图 3-2 底盘 V1.0

我们重新设计了一版底盘，此时叫它底盘 V2.0 吧，因为轮系是底盘的主要部分，所以主要还是对轮系的设计。为了从根本上解决麦轮外八的间隙问题，我们这次没有采用合页（合页真的不可靠，工业级不锈钢合页也会出现外八情况，比普通的金属合页效果稍微好一点），采用自制的铰链（见图 3.2），通过一对止推轴承承受来自轮系两侧板的轴向力和倾覆力矩，深沟球轴承承受径向力，轮系的设计很好地解决了底盘麦轮外八的情况。

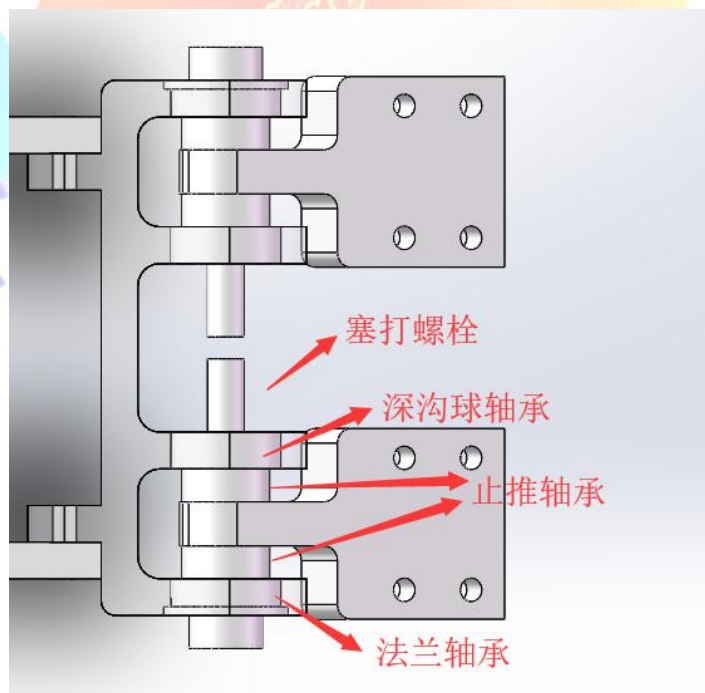


图 3-3 自制铰链

步兵底盘 V2.0 很好地解决了外八的问题，但是为了做好侧方防撞，采用了全包围框架，且使用了 1.5mm 厚度的 20*20mm 铝方管焊接完成，相对于第一版体积增大了，质量也大了很多，比赛中超级电容出现了问题，导致步兵速度较小，以后可以减少铝方管的厚度以及材料选择来减轻底盘重量，提高步兵灵活性。

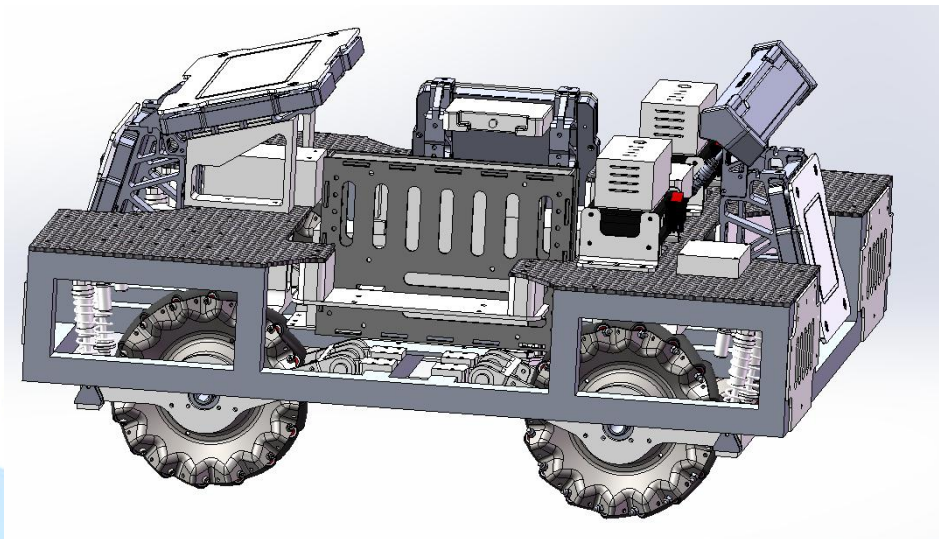


图 3-4 步兵底盘 V2.0

这个底盘是在劳动节的时候装配的，当时也是下了狠心，算是赌一把了，这个时候距离发车差不多只有半个月的时间，如果出问题也只能上场了，不过最后装配出来的结果还是比较满意的，很好的解决了我们战队持续 2 年的麦轮外八的问题，在比赛中也看到部分学校也存在麦轮外八的情况，因此想到了开源步兵轮系结构，方便和大家交流。

3.2 发射模块

在 RM2018 的赛季中，我们在比赛中出现了严重的卡弹问题，导致第一年没有出小组赛，今年我们设计了很多款的拨盘，最终在比赛前决定使用这个卡弹概率极低的拨盘。这款拨盘在拨轮部分参考了官方的开源资料，但是在拨盘结构以及压弹片上做出了创新，极大降低了卡弹概率（大概在 1/500）。在附录中提到了最开始分析整个落弹过程，由于篇幅较长，就不放在正文了，大家有兴趣可以在附录中看一下，如果有问题，欢迎大家指正，正文主要介绍拨盘的修改历程。

3.2.1 拨盘修改历程

1. 螺旋式拨盘

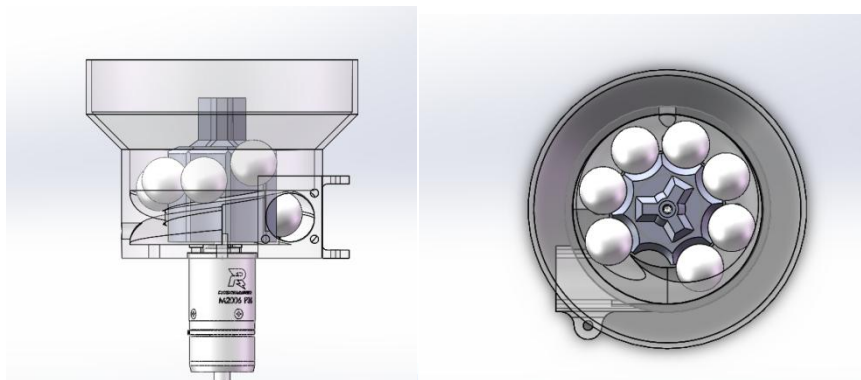


图 3-5

2. 螺旋式拨盘 2（拨轮发生变化）

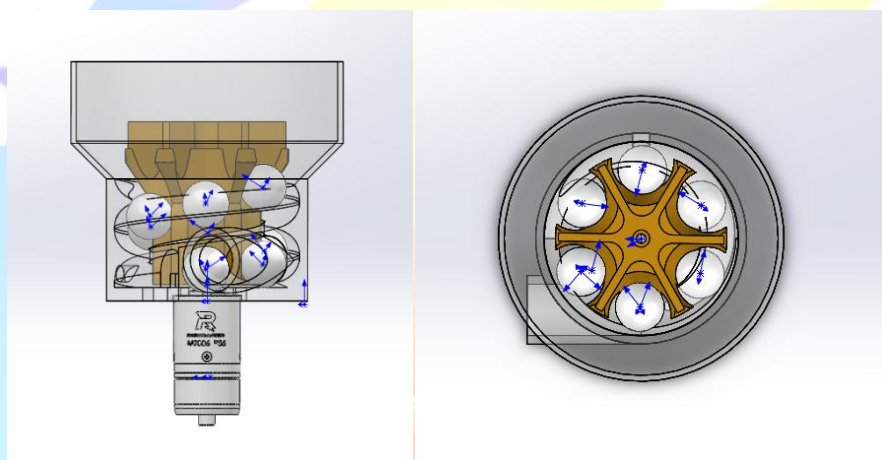


图 3-6

拨盘上方加上搅动片，采用聚氨酯材料。弹道做成螺旋与涡旋形状，使弹丸提前有序排列好。如图所示。由于上方搅动片为聚氨酯材料，允许一定的变形量，可以解决处于涡旋不同位置的弹丸速度不同的问题，拨盘如图 3-7 所示。

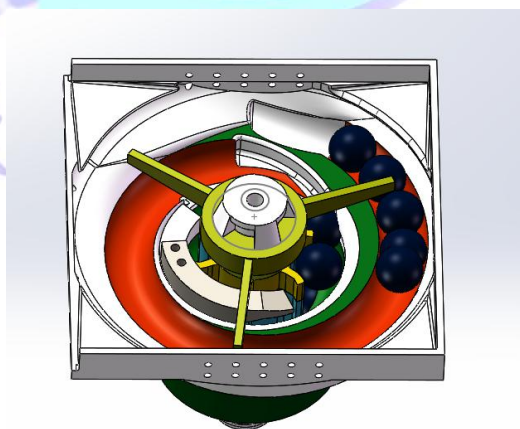


图 3-7

实际实验效果卡弹率 1/100，三齿转的太快了很多弹丸会被拨飞出来，后面

改为一齿，降低拨动的频率。

后期官方拨盘开源，将官方步兵拨盘打印出来实验，经过实验验证官方拨轮实验效果较好，在上面这款拨盘的基础上将官方拨轮结合起来，得到如下拨盘。

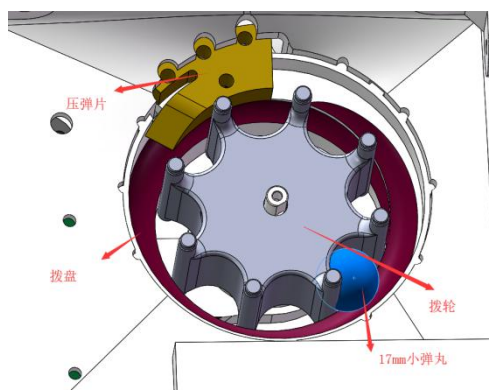


图 3-8 拨盘

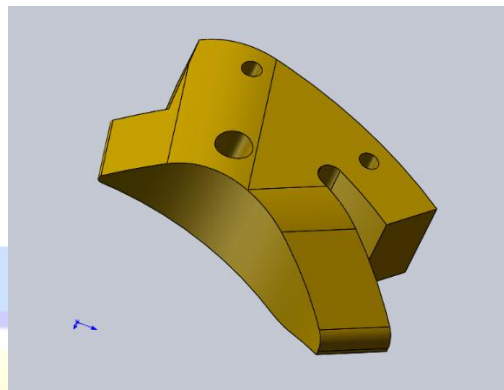


图 3-9 压弹片

具体细节修改

- 1、出弹口处增加两个轴承用以定位弹丸以及减少弹丸对出弹口摩擦力
- 2、拨轮改为圆弧型拨齿+立柱+锥形凸台，使拨齿长度达到最短长度，立柱能够搅动弹丸，又能够使弹丸在进入拨盘前达到有序状态。

后期修改

由于拨轮是一体化打印的，立柱结构比较脆弱，立柱很容易断掉，后面将立柱结构去掉改为立柱孔+销钉，立柱孔有两圈，可以通过自由改变销钉数量和分布实验拨弹效果，比如哨兵内圈放四个销钉实验拨弹效果最好。步兵外圈八根销钉拨弹实验效果最好。

拨盘采用了一个螺旋结构，对进入链路的弹丸进行了一个整齐排列，防止拨轮在快速转动过程中，弹丸即将离开拨盘时发生卡弹现象，但是弹丸进入拨盘前会发生卡弹现象，因此对压弹片进行了一个设计，在压弹片的前后部分均进行了磨削，实现对即将进入拨盘的弹丸进行分离，用柔性材料也可以辅助防止卡弹，使用的是邵氏硬度 85 的聚氨酯材料，后来比赛中都采用相同的压弹片，压弹片制作过程详见哨兵开源文档，这里不再做过多的赘述。

3.3 云台结构

考虑到我们采用的是上供弹的方式，因此在 Pitch 轴采用带传动，减少电机的负载，现在计算云台最佳传动比，可能传动比计算存在一定问题，有问题大家可以提出。

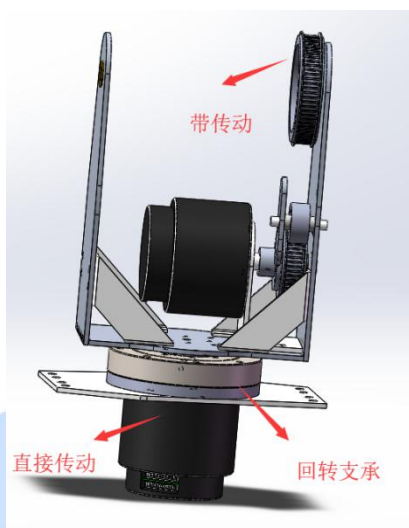


图 3-10 步兵云台

3.3.1 传动比的计算

1、对实际模型建模

由电机的基本功能可知，电机在电功率与机械功率之间的转换越快，其响应快速性越好。功率变化率可表示为 $\frac{dp}{dt}$ 。对于直流无刷电机而言，转速越高，扭矩也就越低，在任意时刻 t_1 时，电机的扭矩为 T_1 。由 $P = T \cdot \omega$ 可知，此时的功率变化率为：

$$\frac{dp}{dt} = \frac{d(T_1\omega)}{dt} = T_1 \cdot \alpha_1 \quad (3-15)$$

α_1 为 t_1 时刻的角加速度，可以表述为：

$$\alpha_1 = \frac{T_1}{J_M} \quad (3-16)$$

将 (3-2) 式代入 (3-1) 式得：

$$\frac{dp}{dt} = \frac{T_1^2}{J_M} \quad (3-17)$$

因此，电机任意时刻的功率变化率与该时刻电机输出扭矩 T_1 、等效到电机轴上的转动惯量 J_M 有关。

传动系统如图所示，其中 J_A 电机转子转动惯量， J_H 负载转动惯量

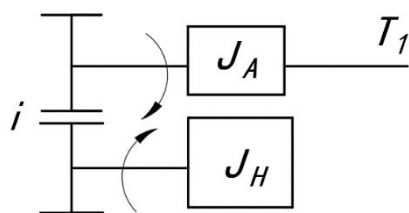


图 3-11 传动系统示意图

假设摩擦力矩 $M_f = 0$, 传动系统的传动效率为 $\eta = 1$, 有

$$J_M = J_A + \frac{J_H}{i^2} \quad (3-18)$$

参考相关资料可知（新型无刷直流电动机建模与仿真研究），在恒定电压条件下，直流无刷电机的机械特性表达式为：

$$\omega = \omega_0 - kT \left(T(\omega) = \frac{\omega_0 - \omega}{k} \right) \quad (3-19)$$

因此，对于负载轴上的运动状态方程可表示为：

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{dt} = i\omega \\ \frac{d\omega}{dt} = \alpha \\ \alpha = \frac{T(\omega)}{J_M} \end{cases} \quad (3-20)$$

负载转动惯量与电机转子转动惯量为：

$$J_A = 2.65 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2, J_H = 0.024 \text{kg} \cdot \text{m}^2 \quad (3-21)$$

表 3-1 6623 无刷直流电机参数

	母线电压	空载转速	堵转扭矩	堵转电流	角度控制精度	重量	转矩常数	转速常数
参数	24V	600RPM	2N·m	5.3A	±0.05°	605g	0.38N·m/A	25RPM/V

根据电机参数可得，在恒定的电压 U_{mot} 下，6623 电机的机械特性曲线为：

$$\omega = 2 - 5T$$

2、基于 MATLAB 的仿真计算

将负载轴上的运动状态方程导入 MATLAB 中，遍历 i 从 0.5 到 3，每次间隔 0.5，得到相应的响应曲线。

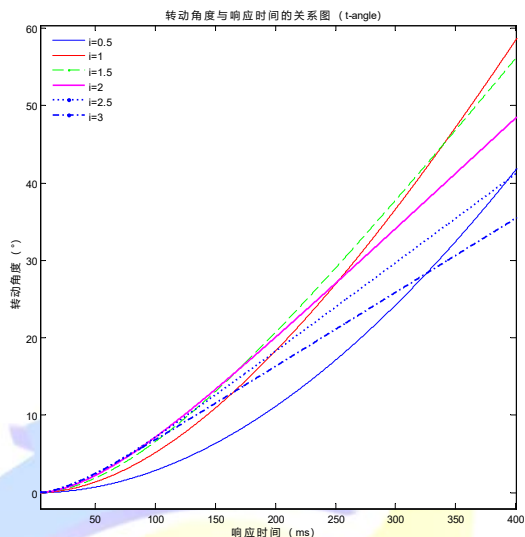


图 3-12 转动角度与总响应时间关系曲线

由图可知，当负载轴转动小角度（ $0-5^\circ$ ）时，传动比越大响应时间越短；转动角度在 15° 到 45° 时，传动比为 $i = 1.5$ 时，响应时间最短；当转动角度继续增大时，传动比越小，响应时间越短。在实际情况下，由于存在阻力矩以及传动效率不为 1 的情况，实际负载比预计负载略大。根据下图可知，负载转动惯量增大，以传动比 1.5 为最佳传动比的转动角度范围也越大。

根据设计要求可知，对于俯仰角的范围都在 45° 内，因此步兵所设计的 pitch 轴传动比选取 1.5。

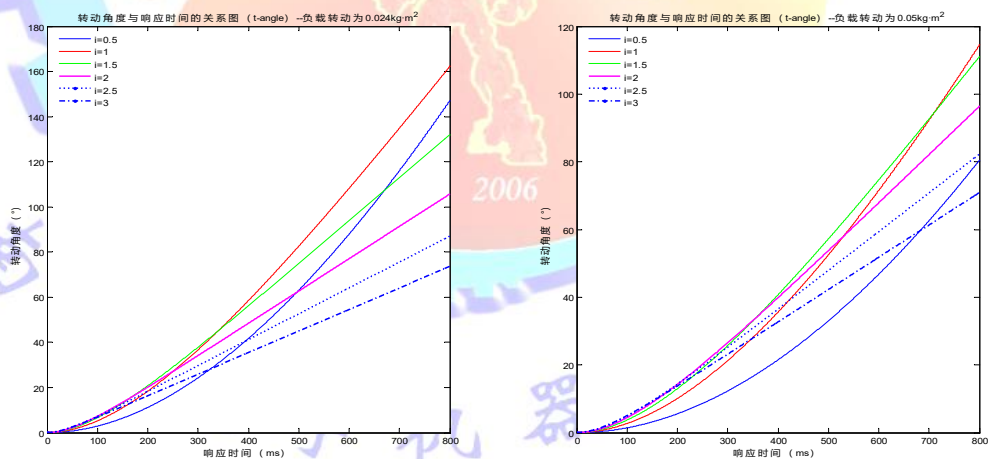


图 3-13 不同负载转动惯量对比图

3、总结

对于 Yaw 轴，在 RM2018 赛季时步兵会由于连接件的间隙出现晃动，因此我们使用了回转支承标准件，回转支承可以同时承受较大的轴向、径向负荷和倾覆力矩，且轴承内外圈均有安装孔，安装较为方便，很好的提高了云台的稳定性，也解决了云台晃动问题，买的是某宝的 RU66 型号，缺点是较大的回转支承质量

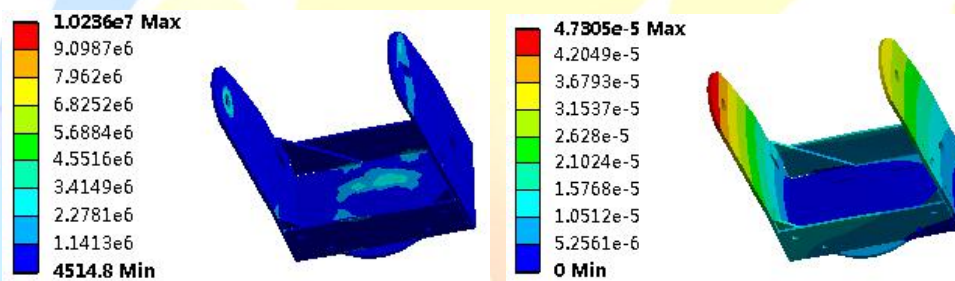
会比较大，且价格昂贵，所以用的时候都是心惊胆战。



第四章 应力计算

4.1 对云台关键结构应力分析

云台支撑件作为承载发射模块的重要部件，其承受着弹舱及发射模块在转动过程中的离心力以及它们自身的重力。弹舱和发射总装的最大转速为 3r/s ，弹舱的自重为 3Kg ，弹舱重心到两带轮侧板轴承孔中心连线中点的距离为 0.07m ，因此转动过程中弹舱自重产生的离心力为： $3 \times (3\pi)^2 \times 0.07 = 18.65\text{N}$ ，发射器的自重为 2Kg ，发射器重心到两带轮侧板轴承孔中心连线中点的距离为 0.09m ，因此转动过程中弹舱自重产生的离心力为： $2 \times (3\pi)^2 \times 0.09 = 15.99\text{N}$ ，带轮侧板的材料为铝合金，进行有限元分析时，可以直接在软件自带的材料库中进行选取。对带轮三维模型添加材料，划分网格，施加约束和载荷后求解得到带轮侧板的应力和变形云图分别如下图 3.10 所示：



(a) 云台支撑部件的应力云图

(b) 云台支撑部件的位移云图

图 4-1 云台支撑部件的有限元分析

由图 4-1a 可以看出，带轮侧板的两个轴承孔和底板处所受的应力较大，最大应力为 10.23MPa ，小于其材料的屈服极限，满足强度要求。由图 4-1b 可以看出，带轮侧板的两个轴承孔周边所受的变形较大，其最大位移为 0.0473mm ，满足刚度要求。

第五章 总结及展望

东北大学在 8 月 11 号拿下总冠军的那一刻，标志着 Robomaster2019 赛季的结束。我们深知距离很多的强队还存在很大的差距，但是一直致力于追求极致，这次开源步兵底盘轮系结构、拨盘及压弹片的结构、云台传动方案也是为了和大家相互交流，希望和大家一起学习进步。

今年我们步兵机器人底盘轮系很好的解决了麦轮外八问题，主要问题是底盘的体积比较大，质量大，以后可以从材料选择以及改变框架方向去优化底盘；云台 Pitch 轴使用了带传动，可以很好的减轻云台负载，减少 Pitch 轴转动惯量，防止电机发热，提高云台响应速度；Yaw 轴使用了回转支承，解决了云台晃动的问题，主要问题是带传动结构比较复杂，且我们设计时结构比较紧凑，拆装比较麻烦，如果 Yaw 轴电机出问题了，每次要拆 Yaw 轴电机都需要把整个云台拆下来，希望以后的设计可以改变电机的安装方式，尽量可以提高拆装效率；拨盘采用螺旋供弹的方式以及压弹片的设计，解决了严重卡弹的问题，降低了卡弹频率，但是压弹片的制作比较麻烦，且比较耗时，希望以后尽量可以做出标准化生产的压弹片。



附录

一、卡弹问题分析

卡弹是因为拨盘受到的阻力矩大于拨弹电机的堵转扭矩。根据弹丸的运动顺序可以分为以下几个可能卡弹的情况：

1、出弹卡

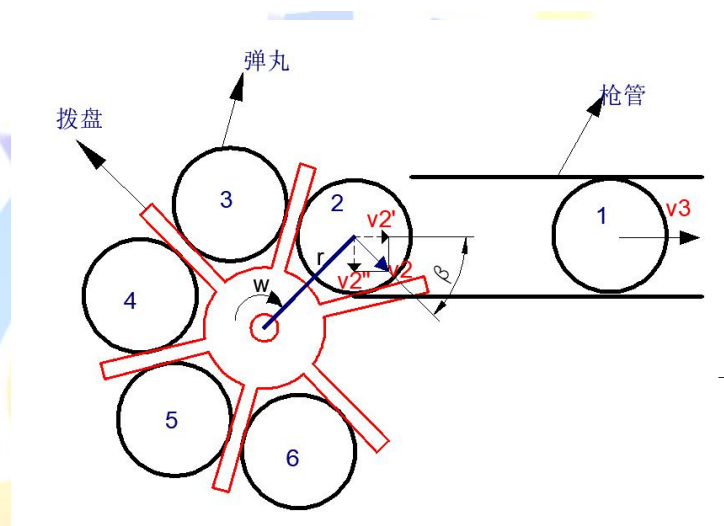


图 3-5 拨盘式

其中 1 号弹丸加速完成，脱离拨盘进入枪管，不会造成卡弹；3，4，5，6 号弹丸已经落入拨盘凹槽中，随着拨盘转动是弹丸加速到 v_2 的速度。最容易卡弹的位置位于 2 号弹丸，在进入枪管时有能量损失，使得速度的变化 $v_2 \rightarrow v_3$ 。

$$v_2 = \omega \times r$$

前提：

1. 忽略弹丸自重的影响 ($3g/颗$)；
2. 不考虑弹丸水平面的自旋，不考虑滚动摩擦力的影响；
3. 将弹丸视为刚体，忽略在运动过程中的变形。

1) 对 2 号弹丸进行受力分析，如图

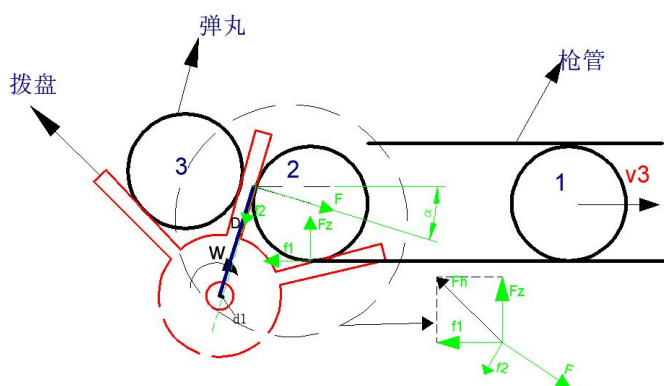


图 3-6 2 号弹状态 1 受力分析

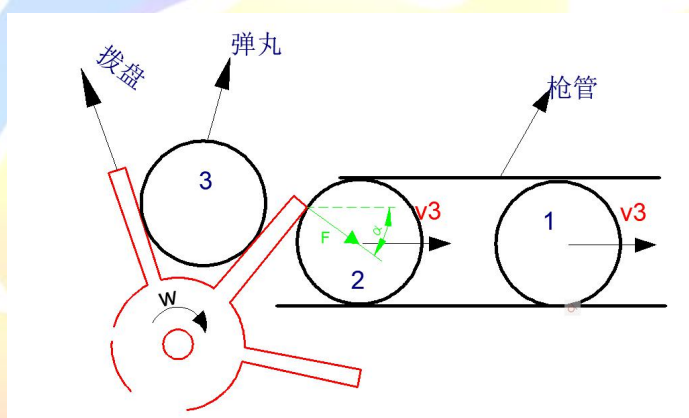


图 3-7 2 号弹状态 2 受力分析

F 始终垂直拨盘的拨齿，且指向弹丸的中心。由弹丸刚开始变速到完全脱离的整个过程中， α 越来越大。 f_1, f_2 均为滑动摩擦力的合力。当处于卡弹时刻，弹丸受力达到静力学平衡则有：

$$f_1 \times R = f_2 \times R$$

$$Fz = F \times \sin\alpha + f_2 \times \cos\alpha$$

$$f_1 + f_2 \times \sin\alpha = F \times \cos\alpha$$

同理对拨盘有力矩平衡：

$$T' = F \times D + f_2 \times d_1$$

整理得：

$$f_1 = f_2$$

$$T' = f_2 \times \left(\frac{1 + \sin\alpha}{\cos\alpha} \times D + d_1 \right)$$

当处于临界卡弹时刻有

$$f_1 = \mu_1 \times Fz$$

或

$$f_2 = \mu_2 \times F$$

① 当 $f_1 = \mu_1 \times F_z$ 时，此时 f_2 为静摩擦力：

$$f_1 = \mu_1 F_z = \mu_1 (F \times \sin\alpha + f_2 \times \cos\alpha)$$

$$f_1 = \mu_1 F_z = \mu_1 \left(\frac{f_1 + f_1 \times \sin\alpha}{\cos\alpha} \times \sin\alpha + f_1 \times \cos\alpha \right)$$

$$1 = \mu_1 \left(\frac{1 + \sin\alpha}{\cos\alpha} \right)$$

当 $1 - \mu_1 \left(\frac{1 + \sin\alpha}{\cos\alpha} \right) = 0$ 时，此时无论转矩多大都会卡弹。将此时的 α 定义为卡弹临界角度 α_1

$$\alpha_1 = 2 \times \arctan \left(\frac{1 - \mu_1}{1 + \mu_1} \right) = 2 \times \arctan \left(1 - \frac{2}{\frac{1}{\mu_1} + 1} \right)$$

② 当 $f_2 = \mu_2 \times F$ 时，此时 f_1 为静摩擦力：

$$f_1 + f_2 \times \sin\alpha = F \times \cos\alpha$$

得：

$$f_2 = \mu_2 \times F = \mu_2 \times f_2 \times \frac{(1 + \sin\alpha)}{\cos\alpha}$$

$$1 = \mu_2 \times \frac{(1 + \sin\alpha)}{\cos\alpha}$$

即当满足关系式 $1 = \mu_2 \times \frac{(1 + \sin\alpha)}{\cos\alpha}$ 时，此时无论转矩多大都不能转动。将此时的 α 定义为卡弹临界角度 α_2

$$\alpha_2 = 2 \times \arctan \left(\frac{1 - \mu_2}{1 + \mu_2} \right) = 2 \times \arctan \left(1 - \frac{2}{\frac{1}{\mu_2} + 1} \right)$$

符号说明：

T：电机提供的转矩

F：拨盘对弹丸的作用力

α ：F 与枪管方向的夹角

D：F 距离拨盘旋转中心的距离

G：弹丸的重力

F_z ：弹丸受到的支撑力

f_1 ：弹丸与支撑面的静摩擦力

f_2 : 弹丸与拨盘的静摩擦力

d_1 : f_2 距离拨盘旋转中心的距离

m : 弹丸质量

g : 重力加速度

R : 弹丸半径

μ_1 : 弹丸与支撑面的摩擦因数

μ_2 : 弹丸与拨盘的摩擦因数

结论:

由此可知:当电机的扭矩一定时,在拨弹过程中能否卡弹主要与摩擦因数(材料)和角度 α 有关。在拨弹过程中 α 不能大于 $\min(\alpha_1, \alpha_2)$ 。在 $0-90^\circ$ 时,摩擦因数越小,允许的 α 角度越大。

假设入射时 F 与枪管方向的夹角为 α_0 , 设在 $V_2 \rightarrow V_3$ 的过程中 α 的变化 $\Delta\alpha$, 则范围为 $[\alpha_0, \alpha_0 + \Delta\alpha]$ 。由以上分析可知,当初始角度 $\alpha = 0$ 时最好, 减短拨齿或改变拨齿形状(曲线)减小 $\Delta\alpha$,也就是切线式拨盘。

因此在选材或设计时可以考虑减小摩擦因数:

- 1.选择光滑材料;
- 2.在易卡弹的入口处增加轴承润滑。

在材料确定的情况下,为了不在入口处卡弹,可以尽量减小 α 的变化,以避免达到临界卡弹角度(最大摩擦角):

1. 减小拨齿长度;
 2. 改变拨齿与弹丸接触面的形状, 拨齿采用曲线形状。
- 2)对 5 号弹丸进行受力分析(3,4,5 一样), 如图

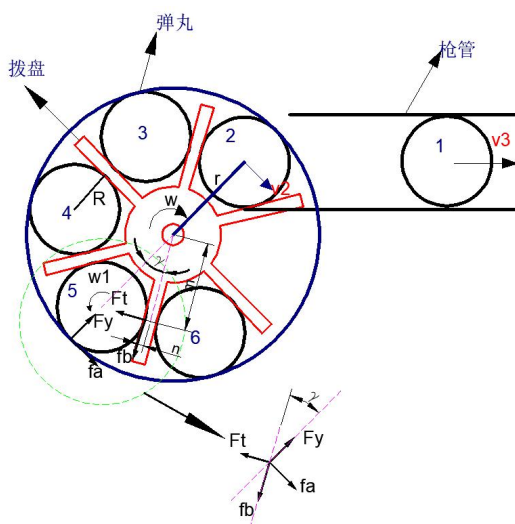


图 3-8 f_a, f_b 均看为滑动摩擦力

当卡弹时:

$$f_a \times R = f_b \times R$$

$$F_y = F_t \times \sin\gamma + f_b \times \cos\gamma$$

$$f_a + f_b \times \sin\gamma = F_t \times \cos\gamma$$

同理对拨盘有力矩平衡:

$$T'' = F_t \times m - f_b \times n$$

整理得:

$$f_a = f_b = f$$

$$T'' = f \times m \times \frac{1 + \sin\gamma}{\cos\gamma} - f \times n$$

当处于临界卡弹时刻有

$$f_a = \mu_a \times F_y$$

或

$$f_b = \mu_t \times F_t$$

① 当 $f_a = \mu_a \times F_y$ 时, 此时 f_b 为静摩擦力:

$$f_a = \mu_a F_y = \mu_a (F_t \times \sin\gamma + f_b \times \cos\gamma)$$

$$f_a = \mu_a F_y = \mu_a \left(\frac{f_b + f_b \times \sin\gamma}{\cos\gamma} \times \sin\gamma + f_b \times \cos\gamma \right)$$

$$1 = \mu_a \left(\frac{1 + \sin\gamma}{\cos\gamma} \right)$$

当 $1 - \mu_a \left(\frac{1 + \sin\gamma}{\cos\gamma} \right) = 0$ 时, 此时无论转矩多大都会卡弹。将此时的 α 定义为卡弹临界角度 γ_a

$$\gamma_b = 2 \times \arctan\left(\frac{1 - \mu_a}{1 + \mu_a}\right) = 2 \times \arctan\left(1 - \frac{2}{\frac{1}{\mu_a} + 1}\right)$$

① 当 $f_b = \mu_b \times Ft$ 时，此时 f_a 为静摩擦力：

$$f_a + f_b \times \sin\gamma = Ft \times \cos\gamma$$

得：

$$f_b = \mu_b \times Ft = \mu_b \times f_b \times \frac{(1 + \sin\gamma)}{\cos\gamma}$$

$$1 = \mu_b \times \frac{(1 + \sin\gamma)}{\cos\gamma}$$

即当满足关系式 $1 = \mu_b \times \frac{(1 + \sin\gamma)}{\cos\gamma}$ 时，此时无论转矩多大都不能转动。将此时的 α 定义为卡弹临界角度 γ_b

$$\gamma_b = 2 \times \arctan\left(\frac{1 - \mu_b}{1 + \mu_b}\right) = 2 \times \arctan\left(1 - \frac{2}{\frac{1}{\mu_b} + 1}\right)$$

结论：

由上可知，在拨弹过程中 γ 不能大于 $\min(\gamma_a, \gamma_b)$ 。在 $0-90^\circ$ 时，摩擦因数越小，允许的 γ 角度越大。因此，在设计弹舱与拨弹半径以及拨齿数量以及宽度时，应该考虑一个齿间距对应的角度应该小于 $2 * \min(\gamma_a, \gamma_b)$ 。

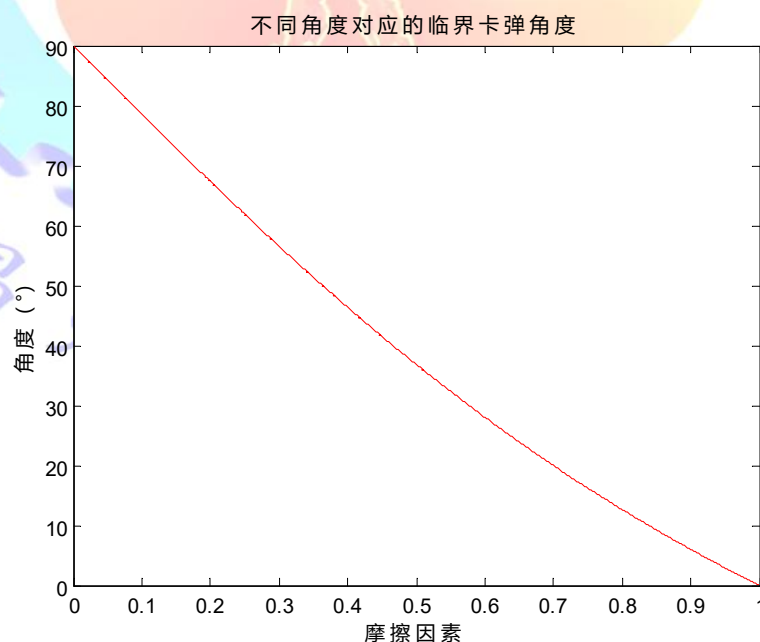


图 3-9 不同摩擦因数对应的临界卡弹角度

由图可知，摩擦因数越小，临界卡弹角度越小，对应的拨盘拨齿数量也应当

越多。摩擦因数为 0.5 时，对应的拨齿数量应为 6 个。为了减小拨盘尺寸，初步选择齿数为 6。

3) 计算拨齿长度

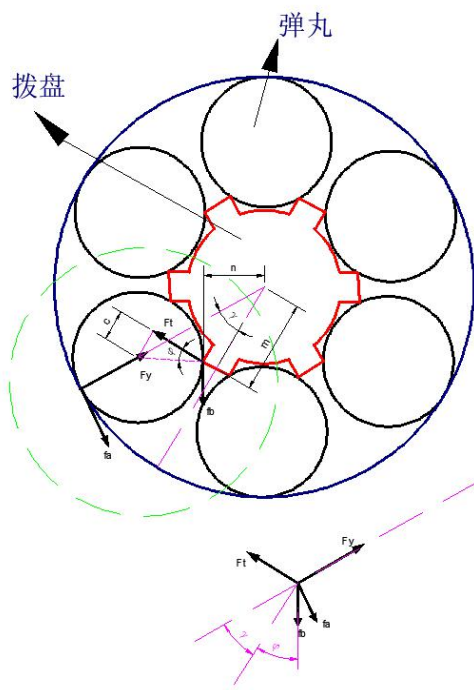


图 3-10 拨齿长度计算

对其进行静力学分析：

$$fa \times R + Ft \times C = fb \times R$$

$$Fy = Ft \times \sin\gamma + fb \times \cos(\gamma + \varphi)$$

$$Ft \times \cos\gamma = fa + fb \times \sin(\gamma + \varphi)$$

由几何关系易得： $\sin\varphi = \frac{C}{R}$

$$T''' = Ft \times m - fb \times n$$

当处于临界卡弹时刻有

$$fa = \mu_a \times Fy$$

或

$$fb = \mu_t \times Ft$$

同理：

$$fa = \mu_a \times [Ft \times \sin\gamma + fb \times \cos(\gamma + \varphi)]$$

$$Ft = \frac{(fa - fb) \times R}{C} = \frac{fa + fb \times \sin(\gamma + \varphi)}{\cos\gamma}$$

$$fb = \frac{fa(C + R\cos\gamma)}{R\cos\gamma - C\sin(\gamma + \varphi)}$$

整理得：

$$\gamma = \delta - \arccos\left(\frac{\mu_a R \cos\varphi}{A}\right)$$

其中：

$$a = R - \mu_a C \cos\varphi - C \sin\varphi;$$

$$b = \mu_a R - \mu_a C \sin\varphi + C \cos\varphi;$$

$$A = \sqrt{a^2 + b^2};$$

$$\delta = \arctan\left(\frac{b}{a}\right)$$

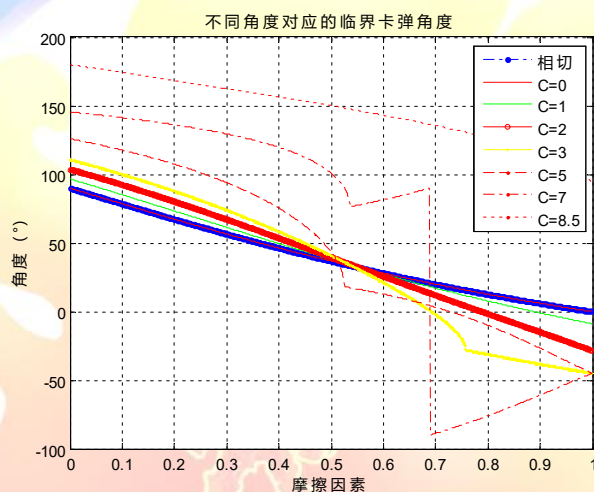


图 3-11

由图可知，当 C 越大，即拨齿越小时，摩擦因数越大越容易出现卡弹的情况。由于弹舱和拨盘是不规则形状，一般是采用 3D 打印材料-PLA.弹丸材质是聚氨酯摩擦因数比较大。而且为了减小在出口处的卡弹几率，拨齿越短越好。综合考虑选择 C=0，即弹丸半径与拨齿的垂足点在拨齿末端。

(2) 落弹卡弹

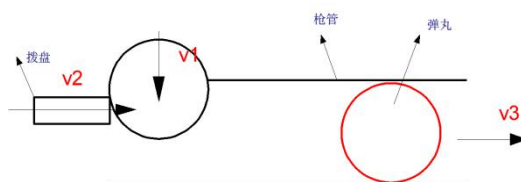


图 3-12

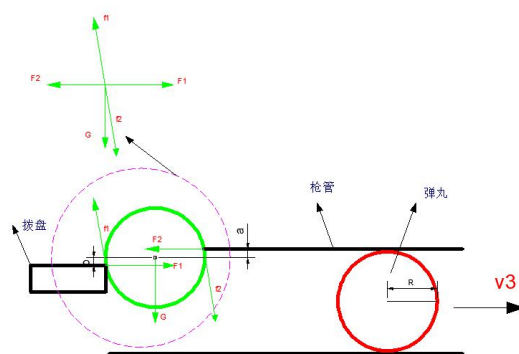


图 3-13

忽略弹丸重力，当卡弹时达到静力学平衡。

$$F1 = F2 = F$$

$$f1 = f2 = f$$

$$(f1 + f2) \times R = F1 \times a + F2 \times b$$

整理得：

$$2fR = F(a + b)$$

同上，当达到 $f1$ 或 $f2$ 达到最大摩擦力有

$$f1 = \mu_1 F1$$

或

$$f2 = \mu_2 F2$$

所以：

当

$$2\mu_1 R = a + b$$

或

$$2\mu_2 R = a + b$$

因此在设计拨盘的高度时应该满足 $a + b > \max(2\mu_1 R, 2\mu_2 R)$ 。

1. 在下落的过程中碰不到出口；
2. 将出口口径加大；
3. 采用柔性挡块。

实际上弹丸会受到挤压变形以及在下落时存在滚动等，弹丸受力非常复杂，因此最好避免单纯弹丸靠重力垂直下落。

二、结构设计

综合以上分析，拨齿结构如图所示：

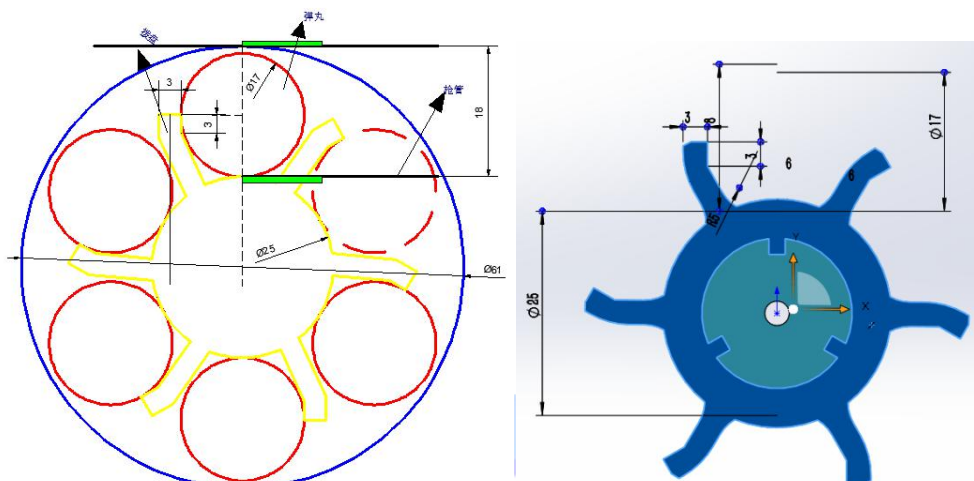


图 3-14 拨轮结构设计

拨盘上方加上搅动片，采用聚氨酯材料。链路做成螺旋与涡旋形状，使弹丸提前有序排列好，如图 3-15 所示。由于上方搅动片为聚氨酯材料，允许一定的变形量，可以解决处于涡旋不同位置的弹丸速度不同的问题。

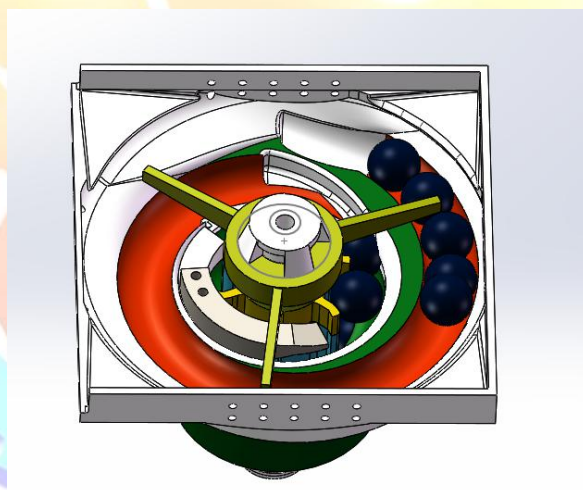


图 3-15 拨盘结构

将拨轮进行了细节修改，加高了拨齿高度使得弹丸达到更有序列性，并将材料改成聚氨酯材料以减少卡弹问题。