

一种拨弹机构思路与设计开源

南方科技大学 邹元浩 汤兆恒

关键词：拨弹机构，卡弹，空弹，预排弹，预旋转，拨弹原理，分隔弹仓，弹丸下落缓冲板，稳定射频，分层实体制造 LOM，激光切割

摘要：本文讨论描述的是 RoboMaster 机甲大师赛供弹机构中主流的拨弹轮方案。全文有三大板块：卡弹分析思路，拨弹机构的迭代研究和拨弹结构最高射频的理论计算。本文提供了一种拨弹轮设计思路及图纸，一种零件制造方法，一种卡弹分析思路以及一种对拨弹轮最高射频进行理论计算的方法。本文目标是帮助新队员对于拨弹轮更好的进行初步理解和认知，同时也给老队员提供一种方案和思路来进行比较和改进。文章末尾附有部分新名词定义和解释。

目录

一种拨弹机构思路与设计开源	1
0 . 引言	2
1 . 拨弹轮工作原理与卡弹的原因概述。	2
1.1 供弹过程抽象理解	2
1.2 拨弹轮搅动使大量弹丸形成稳定结构导致卡弹	3
1.3 在拨弹轮旋转过程中弹丸与拨弹轮直接形成自锁导致卡弹	3
1.4 拨弹轮出口处拨轮、弹丸与导向出口结构自锁导致卡弹	4
1.5 拨弹轮旋转速度过快导致卡弹	4
1.6 其他原因	5
2 . 拨弹机构：从入门到卡弹	5
2.1 入门：入门即卡弹。	5
2.2 再入门：开源图纸再入门	6
2.3 入门成功：找到方向后的深入研究	9
第二代拨弹机构射速上限的计算	12
2.4 尝试与过渡	16
2.5 突破：从 5 发每秒到 14 发每秒	20
第四代拨弹轮卡弹分析	25
3 . RM 论坛开源拨弹机构讨论	27
4.Q&A	29
5.总结	30

0 . 引言

拨弹轮作为各个队伍的核心技术之一，是比赛胜负的重要决定因素。然而，部分队伍在拨弹轮上的研发并不够深入，部分步兵的最高射速甚至无法用满碉堡上的三倍冷却 Buff，在射速高的队伍中，有一部分采用了官方 ICRA 机器人的拨弹轮，没有自己的设计。该种拨弹轮能够达到很快的射速，卡弹的情况也非常少见，但是该种拨弹机构形状特殊，需要用到 CNC 或者 3D 打印等技术制作，精度要求高，成本较高。而对于照搬结构而不去研究深层次原理、不进行理解改进的行为，我们并不认同。由于特殊原因，对于拨弹轮的研究被终止，截至研究终止前，第四代原型机五齿所能达到的最高射频为 15 发/秒，不会出现反转无法解决的卡死情况，遂将研究至今成果完全开源，供各个参赛队讨论，体现工程师精神，精益求精。本文仅尝试提供一个使用更低的精度要求和成本来制作具有高射速、不卡弹、少空弹的拨弹机构的思路和一种对拨弹机构卡弹分析与计算射频上限的方法，权当抛砖引玉，希望文中的愚见能给各位带来启发。开源目的在于加强参赛队之间交流，有助于提高自身和其他参赛队的水平。

1 . 拨弹轮工作原理与卡弹的原因概述。

通常情况下，RM 赛场上的硬质【**拨弹轮**】都是指能够通过重力作用装填，通过多个拨轮与多个弹丸硬接触将弹丸通过旋转加速到一定速度从而推出弹舱的推入供弹链或者直接推入摩擦轮的结构，这个定义看似废话，但是却对拨弹轮的分析却至关重要。每一种拨弹机构的最高射频都是与结构相关的。尽管拨弹轮千变万化，供弹方式也有上下之分，现有的拨弹轮的卡弹原因仍然出现在比较一致的几个地方，想要制作转速更快的拨弹轮，必须对这几个原因进行深入解析。

1.1 供弹过程抽象理解

现在主流的拨弹轮供弹方式我们可以从一个抽象的角度去分析。简单的说，弹丸发射过程是一个由“体”转化“点”的过程。首先，很多很多的 17 毫米小球在弹仓中堆积，由于等径密堆，形成类似 HCP 或是 FCC 的密堆晶体结构。我们把这个状态称为“体”。接着拨弹轮化“体”为“面”，拨弹轮的孔位将堆积的体中的弹丸排列成规则排列的面上的弹丸。然后再通过拨弹轮的旋转，和供弹链的限位化“面”为“线”。即弹丸从拨盘的“面”上，被拨弹轮旋转，然后沿切线进入供弹链。最后由发射机构断“线”成点。即“线”中的弹丸到达摩擦轮或气动发射机构，获得较高速度，与后边弹丸分离。由体化面，面成线，线断点，完成整个发射链路过程。也就是一个获得有序性的过程。



图 1.十七毫米弹丸的等径密堆积

1.2.拨弹轮搅动使大量弹丸形成稳定结构导致卡弹

拨弹轮在高速旋转的时候，弹丸同时下落，排列，当若干个弹丸依托弹舱壁形成一个稳定的自锁的类似三维晶体的结构阻止拨弹轮旋转时，轻则空弹，重则卡弹，这种卡弹几率与拨弹轮的拨轮数正相关，在 Robomaster 论坛大佬说栏目中提到应该使用尽量标准的圆柱形的弹舱，也是为了减少弹丸最终与弹舱壁形成自锁的概率。同时，形成的不确定的弹丸下落角度也会造成对其他卡弹原因的分析困难。

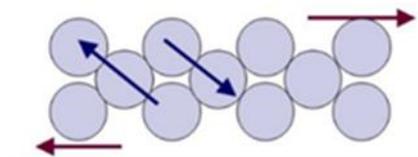


图 2.弹丸密堆积，在弹仓内无法滑移

1.3 在拨弹轮旋转过程中弹丸与拨弹轮直接形成自锁导致卡弹

拨弹轮旋转中，弹丸受到拨轮的横向推力，拨弹仓底部摩擦力和拨弹仓侧壁摩擦力，在大部分情况下，拨轮推力始终大于两个摩擦力，弹丸能够不断地滚动而保持稳定，但是在外部扰动与拨轮形状设置不合理、摩擦系数过大的共同作用下，弹丸可能受力不均陷入自锁、弹出拨弹轮、甚至潜下拨轮，轻则卡弹，重则掰断拨弹轮。

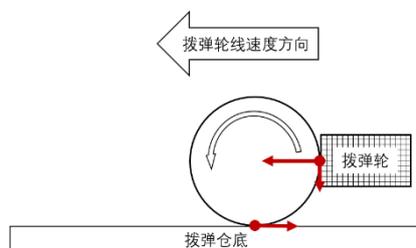


图 3. 拨弹过程中弹丸受力侧视图

1.4 拨弹轮出口处拨轮、弹丸与导向出口结构自锁导致卡弹

拨弹轮将弹丸推出旋转区域，需要解决拨轮旋转和弹丸推出产生的矛盾。以往常用的方法是采用水平方向上切线供弹，利用橡皮筋等结构在圆周切线方向上推出，虽然在推力的大小上获得了最大值，却容易在出口结构上获得最大的反作用力或者没有向外的推力，形成卡弹或者空弹，如果拨轮形状不合理，甚至在一个锐角角度上包裹夹紧弹丸，当弹丸在出弹口卡死的时候，拨弹轮即使反转也难以解除卡弹，出现这种情况，任何拨弹机构都可以说进入无力回天的状态。

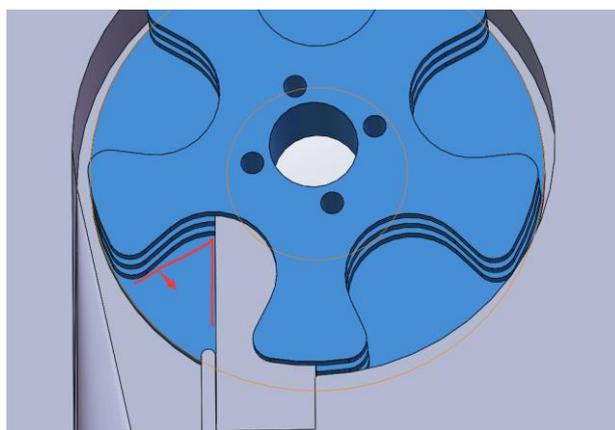


图 4. 拨弹轮与导向片之间的夹角为锐角，容易发生夹住卡弹。

1.5 拨弹轮旋转速度过快导致卡弹

拨弹轮旋转速度过快导致卡弹，也就是射频超过了该拨弹机构结构的最高射频时会卡弹。拨弹轮是通过使得弹丸直接落入到旋转位置的，弹丸下落到底部最快的情况是自由落体，每

一颗 17mm 弹丸一半自由落体进入到单孔拨弹轮底部的时间是 $\sqrt{\frac{2 \times 17 \text{mm}}{9.81 \times 2}} = 0.042\text{s}$, 取倒数, 即为 24.01 发每秒, 说明单孔拨弹轮不计弹丸与拨轮碰撞产生的垂直速度情况下最大射频接近 24 发每秒。当超过此数值, 弹丸将只能下落到中途而不能到底部, 被拨轮顶出旋转区域, 或者带到意想不到的地方, 造成卡弹。当然这个数值非常的高, 这是在完美解决卡弹空弹问题后能达到的数值。根据后文结论, 拨弹轮齿数与射频在同等条件下呈正相关, 只是卡弹概率和制造难度也随齿数增加而增加。所以一个五齿理想拨弹轮最高射频可达 120 发每秒。而实际上, 由于客观原因, 例如结构强度, 精度等限制还有出弹口上方等卡弹位置的存在, 是远远不能达到这种理论上限的。可以说, 拨弹轮结构的设计提升空间是很大的。

1.6 其他原因

拨弹轮卡弹还有别的原因, 比方说在设计上干涉了或者说是供弹链路卡死, 这些问题都是属于较容易解决的问题或者不在本文讨论范围里, 故省略。

供弹链路的问题我们也有研究, 我们得出的其中一个结论是方形供弹链相对于圆形供弹链具有一定优势。

2 . 拨弹机构：从入门到卡弹

——“你在平原上走着走着, 突然迎面遇到一堵墙, 这墙向上无限高, 向下无限深, 向左无限远, 向右无限远, 这墙是什么?”

——“卡弹。”

2.1 入门：入门即卡弹。

最初接触拨弹轮是在 2018 赛季。那时队内采用下供弹软管系统, 拨弹轮表现不佳。当时分析的主要原因有三: 第一, 供弹系统中存在由于弹仓形状设计问题, 弹仓中的弹丸未能及时落入拨弹轮的问题。第二, 熔丝制造的三维打印弹仓底部粗糙且拨弹轮较薄, 拨弹轮过高是容易导致弹丸把拨轮卡起来。第三, 拨弹仓的切线出口处挤压卡弹。对于这三个问题的解决思路在暑假逐渐成型。

为了方便描述技术迭代,这里把2019赛季整个拨弹轮研发过程和技术迭代分为了四代。实际上技术迭代和讨论是一个连续的过程。

2.2 再入门：开源图纸再入门

第一代拨弹机构设计（2019.1 完成）：

关键词：梳状多片拨弹轮。

2019 赛季。这是第一次设计拨弹轮。这次拨弹轮设计的拨弹轮形状曲线基于厦门大学嘉庚学院&厦门大学联队于2018年7月22日开源的高松三号步兵图纸。感谢开源。

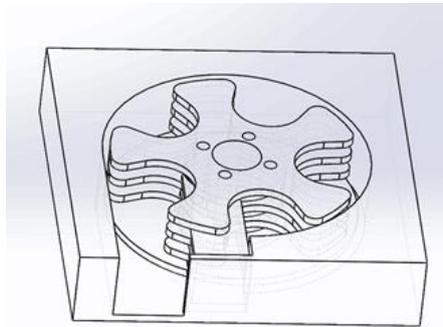


图 5.第一代梳型拨弹轮

如题，梳型多片拨弹轮在这次设计中表现为三片拨弹轮与出口处的三片导向片的交错组合。同时在梳型拨弹轮基础上得以设计拨弹轮转盘。该设计的拨弹轮曲线采用形状和切线直线供弹有优化空间，这在第二代拨弹轮出口卡弹问题会有讨论。

2.2.1 设计需求：

以往单片拨弹轮位于弹丸中间，未进入拨弹轮孔的弹丸落在拨弹轮片上，与弹仓中底部弹丸有半个弹丸左右的高度差，跟随拨弹轮旋转，与弹仓中堆积的弹丸碰撞挤压，并且依托弹仓壁形成一个稳定的自锁的结构阻止拨弹轮任何一个拨轮旋转时，轻则空弹，影响射频，重则卡弹。用手拨动弹丸可以解决。下供弹结构弹丸储量大，问题明显。

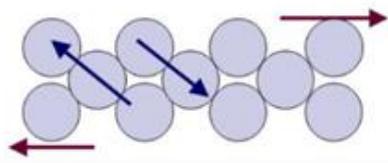


图 6.弹丸堆叠自锁示意图

为了使用更高的出弹口导向, 拨弹轮底部往往在弹丸中部附近; 熔丝制造的拨弹轮较软, 而且有安装精度问题; 拨弹仓底面粗糙; 同时高速旋转的拨弹轮力量大, 这些都有可能致导致弹丸把拨弹轮从底部卡起来。

18.在测试时常常发现拨轮与拨盘间的距离很难把控, 过低容易碰到, 过高容易导致弹丸把拨轮卡起来。想请教一下这款弹丸拨轮下表面距离拨盘上面距离时多少? 如果是距离是逐渐增大的, 那么在拨轮与弹丸接触阶段的最大距离是多大。

首先距离不是渐变的 距离的话 是7mm 红色部分是内径2外径5厚度2.5mm的轴承

图.7 RM 圆桌提问“过低容易碰到, 过高容易导致弹丸把拨轮卡起来。”

2.2.2 解决方案：梳型多片拨弹轮

设计灵感：深圳北高铁站候车厅出口的单向旋转门采用的梳型门页。



图 7.深圳北高铁站单向出口的梳型门页

设计特点：

梳型拨弹轮与导向片：多片拨弹轮与导向片交错运动，固定在拨弹仓的导向片可以给各层拨弹轮支撑和定位功能。拨弹轮与弹丸接触受力的位置不再限于弹丸中上部分，中间两片拨弹片可以上下均匀推动弹丸。最顶部的拨弹轮上表面与落入空位中的 17mm 弹丸顶部平齐，可以达到空位中有弹而预排弹管道中的弹丸不会下落的效果。

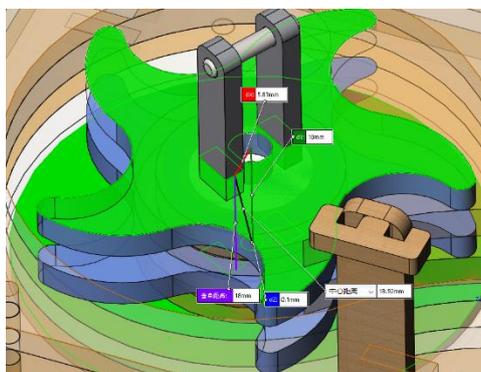


图 8.拨弹轮上表面距离拨弹轮转盘上表面 18mm，即为一个弹丸高度加 1mm 空余。

拨弹轮转盘：得益于梳型导向片得以实现。拨弹轮转盘与拨弹轮固连。弹丸落入空位后如同骑上旋转木马，弹丸底部与拨弹轮底盘相对静止被电机带动旋转，弹丸底部不会产生运动方向上的滑动摩擦，降低弹丸与拨弹仓底面摩擦挤压卡弹风险，降低拨弹仓底部所需加工精度。

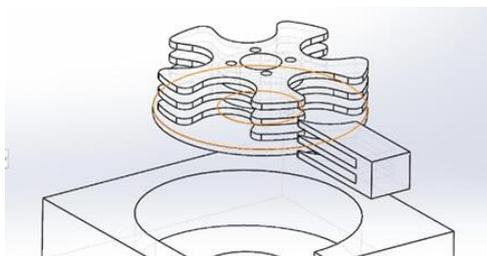


图 9.橙色所示部分即为拨弹轮转盘设计

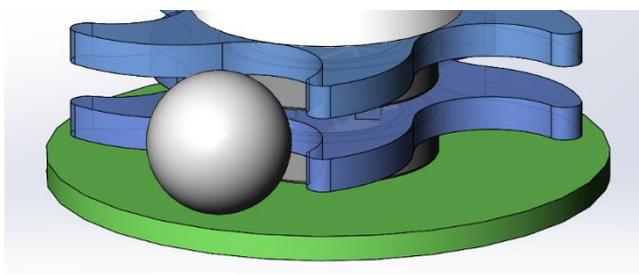


图 10.第四代拨弹机构中绿色圆盘即为拨弹轮转盘设计

注：梳型拨弹轮的设计在大连交通大学的拨弹机构开源以及同济大学设计报告中均有提及，说明这种设计已经比较应用广泛并且效果不错，具有优势。而本文描述的拨弹轮转盘是一种能进一步增加这种梳型设计拓展性的设计。

2.2.3 加工实验结果：

制造加工方法：分层实体制造 LOM。激光切割机。

分层实体制造 (LOM)：即为板材三维打印，是三维打印技术的一种。与机器人比赛中常用的三维打印（熔丝制造 FDM，数字光处理 DLP）原理类似。都是通过将数字三维模型切片，降维成易于加工的二维图纸。打印机通过读取文件中的横截面信息，用液体状、粉状或片状的材料将这些截面逐层地打印出来，再将各层截面以各种方式粘合起来从而制造出一个实体。分层制造，逐层叠加。

分层实体制造与 FDM，DLP 等不一样的是，它可以使用薄膜，板材等材料，不必拘束于几种低熔点塑料的限制。LOM 的原理是先将板材按照横截面生成的二维图纸，利用激光切割机切割板材，然后通过连接件或热熔胶，将各横截面堆叠排列，制成实体。

相比于 FDM, 优点: 1.制件精度高。板材表面方向可保持原有性质, 例如光滑。切割方向上的精度由于激光切割也会比一般 FDM 要高。而堆叠方向上的精度由板材厚度决定。2. 无需额外表面处理。因为不需要设计和制作支撑。3.快速成形。有激光切割机或雕刻机的学校和战队, 可快速制成适合 LOM 制造的工件。4. 成形件的力学性能较高。由于扩充了三维打印材料的范围, 力学性能更好的但是难以熔丝制造的材料也可以进行三维打印。LOM 制成工件可耐高温, 熔丝制造工件不耐高温。

适用板材: 亚克力, PP 板, 轻木, 层板等。并且可以对单个截面制成的板材工件独立进行精加工, 加工方便且细致。还可以板材混搭, 获得更好的机械性能。

适用: 熔丝制造不满足光滑或力学性能的工件, 且没有过高机械性能要求的 CNC 加工的工件。快速测试 CNC 实体配合。堆叠方向精度要求与板材厚度相关。

测试结果及存在问题

1. 导向片难以固定。
2. 拨弹轮底盘效果显著, 拨弹轮阻力明显下降, 弹丸在拨弹轮中运动时没有阻碍。
3. 拨弹轮固定到电机比较费时。
4. 手拨工况良好, 拨弹仓出弹口发现卡弹部位。而上电后卡弹明显, 弹丸在出口处被锁死。
5. 发现拨弹轮曲线(厦大开源)与直型切线导向片的夹角存在卡弹风险: 拨弹轮前沿与导向片所形成夹角有较长的距离是锐角, 只有特定情况下, 弹丸才能从拨弹轮的圆角处被推开。

2.2.4 阶段总结: 得出拨弹轮曲线与导向片之间的夹角(简称出口夹角)如果是锐角, 即有卡弹风险。应将拨弹轮曲线往后弯曲, 同时切线出口也可以往相反方向弯曲, 达到在拨弹轮与导向片相交的过程中, 出口夹角始终为直角或钝角。具体如如第二代拨弹机构设计。

2.3 入门成功: 找到方向后的深入研究

第二代拨弹机构设计 (2019.3 完成)

关键词: 钝角出口夹角, 一体式导向片, 定位销联轴拨弹轮。

2.3.1 曲线修改：基于第一代拨弹轮的经验，我们修改了拨弹轮曲线和切线直线出弹，改为切向曲线出弹。具体方法如示意图。这个修改目的是为了使出口夹角始终保持钝角，不会有夹住弹丸的风险。

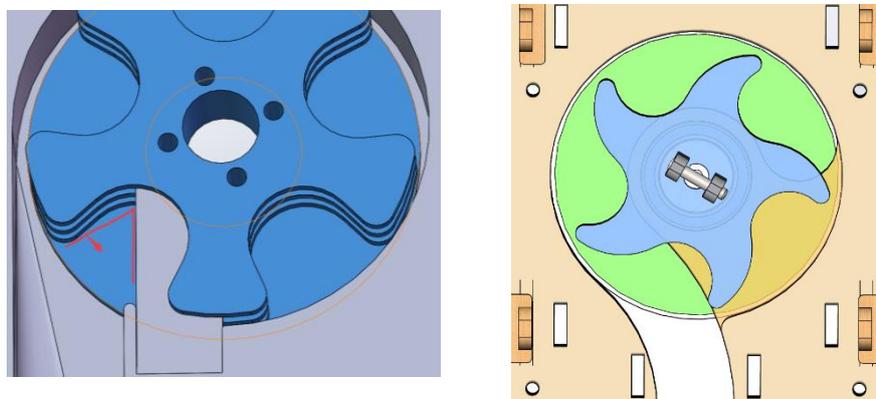


图 11.修改前后的拨弹轮曲线和出口导向曲线

实验发现，这个解决思路是正确的。从此再无出弹口卡弹。

实验过程中还有一个发现：使用修改后的拨弹轮曲线，手指从出弹口伸进去也是夹不住，会被旋转的拨弹轮有节奏的推出。以前每次排除卡弹的时候手指不敢伸进去，怕夹手，但是一个不夹弹的拨弹轮曲线无论对于弹丸还是对于队员的手指都应该是安全的。当然，如果有信心想要尝试，请【注意安全】，随时断电。

第一代导向片难以固定的问题，在第二代得以解决。

同样地，我们使用 LOM 分层实体制造的方法，这次用的更加极致。导向片与拨弹仓连为一体进行制造，导向片可以固定结实，并且非常适合 LOM 的制造方式。

分层实体制造的方法把一个工件切片分为各个板层，每个板层可以独立制造处理，最后再按顺序拼装即为完整工件。利用这种 LOM 的方法，我们可以做到其他制造方法做不到的难点：

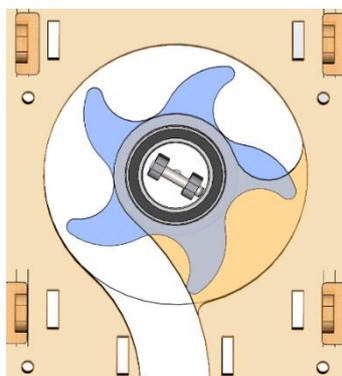


图 12.轴承安装可提供定轴心作用

一体制作导向片和拨弹仓并把梳型拨弹轮嵌入安装进去。而使用 LOM，我们在组装的时候就可以一层导向片，一层拨弹轮，一层导向片，一层拨弹轮如此堆叠安装。并且在导向片中我们还可以设计安装轴承用来定心和减少旋转阻力。这些同轴心，面重合的机械限位保证了拨弹轮的稳定运转。



图 13.实装效果

定位销连接拨弹轮

第一代拨弹轮还有一个问题：拨弹轮连接电机。由于分层实体制造的原因，在 4mm, 5mm 亚克力板侧面是无法打孔来安装电机轴上的销孔的。第一代仅靠轴向螺丝和 D 形孔固定容易造成松脱。在这第二代的迭代中得以解决。我们使用了两根方型定位销对拨弹轮进行传动和定位，定位销前端开孔，使用光轴穿过电机径向孔和定位销的孔，使电机传动给定位销，再传动到拨弹轮上。

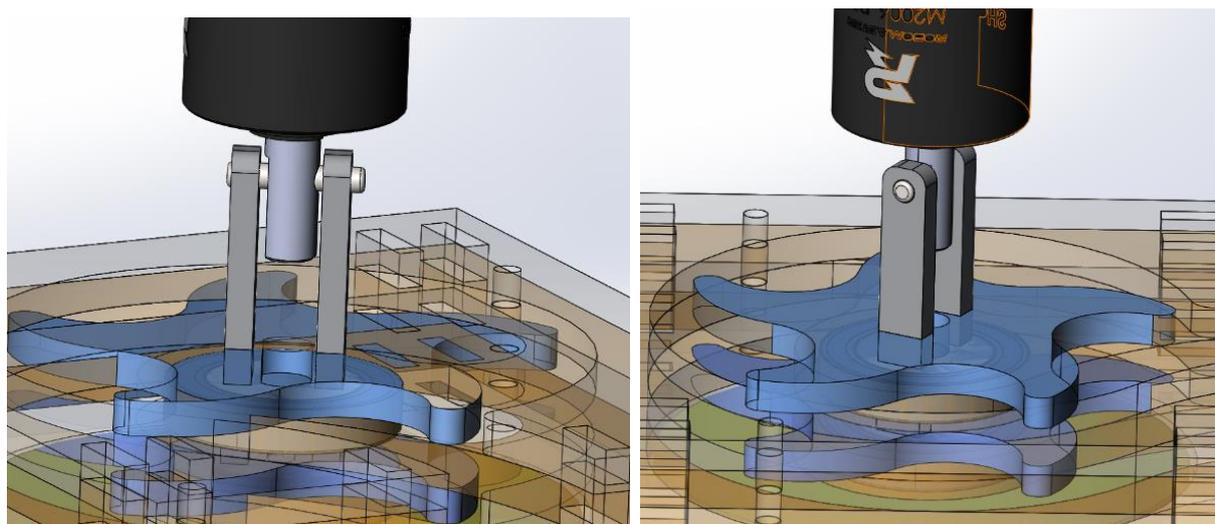


图 14.传动定位销示意图。

第二代拨弹轮实测数据连续拨出 28 发耗时 5.4 秒，无空弹。平均射频 5.2 发每秒。该射频为此结构射频上限。长时间循环拨弹无卡弹空弹出现。高于该射频有概率卡弹，可通过电机反转 0.2 秒排除。后面是对于这个射频数值的理论验证计算。



图 15.GIF.拨弹轮曲线测试

理论验证计算：(画重点)

注：该第二代拨弹机构理论计算的前提包括预排弹设计，预排弹在第三代设计中描述。

第二代拨弹机构射速上限的计算

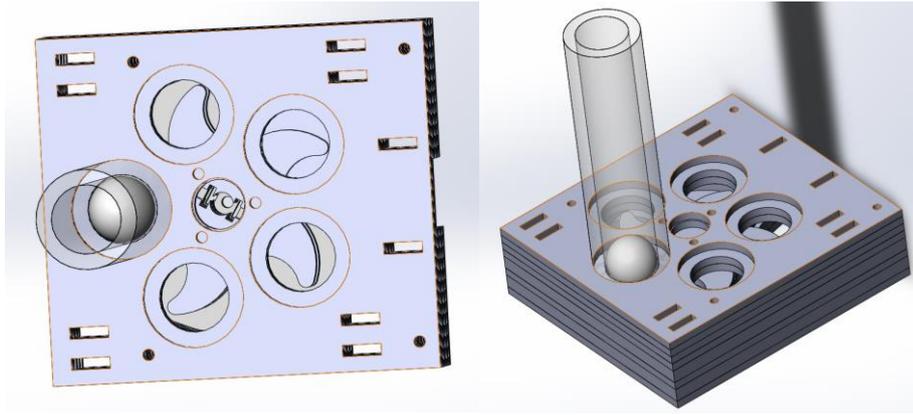
邹元浩

在实验中，在预排弹口处、拨弹仓出口处均未出现卡弹的情况，卡弹主要发生在拨弹轮与预排弹出口处。弹丸被拨弹轮与预排弹出口处夹住，无法下落。实验测得拨弹轮最快拨弹速度约为 5 发/秒。

注：预排弹设计：通过机械结构自动将弹仓内弹丸有序化，以便快速进入拨弹轮。例子：供弹系统中存在由于弹仓形状设计问题，弹仓中的弹丸未能及时补充入拨弹轮的问题。这里的解决思路是利用圆柱形管道对弹仓内弹丸进行储弹和预置，利用步兵行走的射击空窗期的移动晃动,使弹仓中弹丸进入圆柱形管道，排列弹丸，自行对弹丸预置。

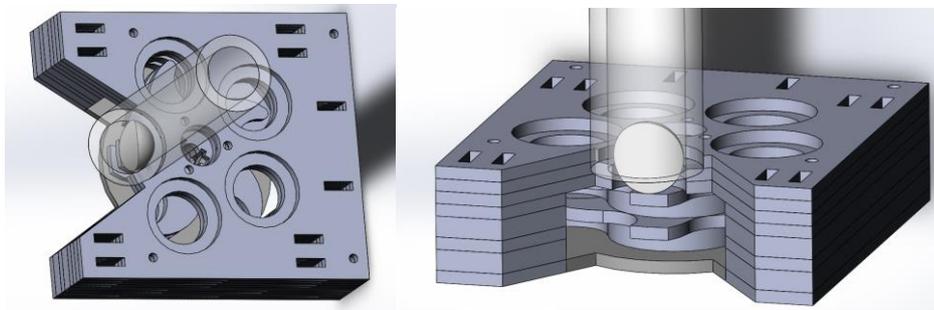


对于第二版拨弹轮，我们可以为其建立以下的模型，以计算出其理论的射速上限

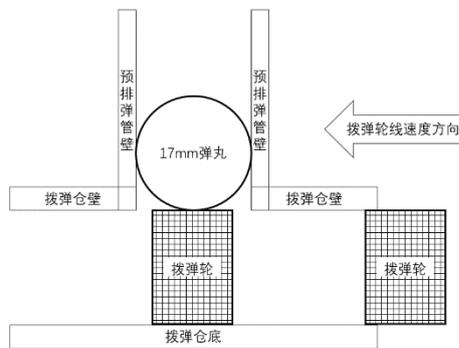


如图，我们假设一个最简单的情况，一枚 17mm 弹丸由于拨弹轮顶平面阻挡无法下落而静止在拨弹轮顶平面上（初态）。

此时，如果我们沿着中心圆周剖开，可以看到如下的情况。

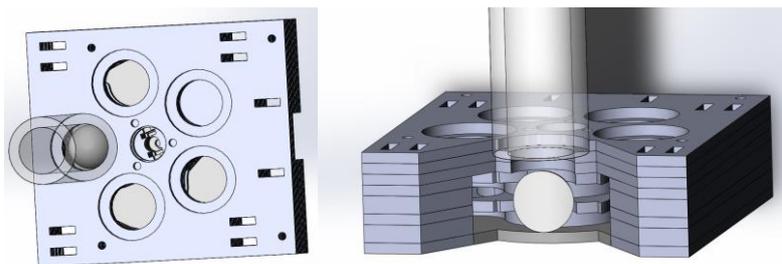


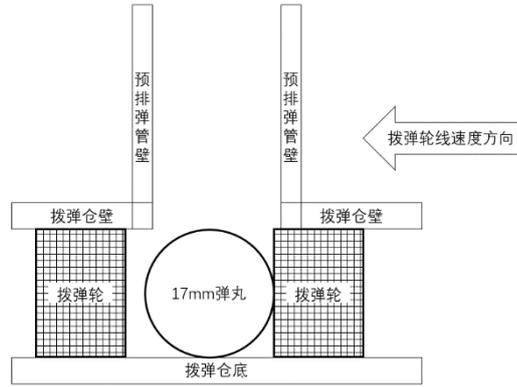
将上面的视图作适当的简化，可以粗略地化为如下的平面图。



在中心圆周上剖开拨弹轮得到的侧视图

弹丸被卡住的过程发生在 17mm 弹丸掉落到拨弹轮空隙、拨弹仓底中的过程（终态）。





在此运动过程中，我们做出以下假设，来简化我们的分析过程。

① 由于拔弹轮与弹丸之间摩擦力主要使弹丸旋转，该摩擦力可以被忽略，即拔弹轮与弹丸绝对光滑；

② 由于拔弹轮线速度较低，可以认为拔弹轮与弹丸产生的碰撞为完全非弹性碰撞；

③ 在实验中未发现除预排弹出口外其他位置有卡弹现象，可以认为其他位置不卡弹。

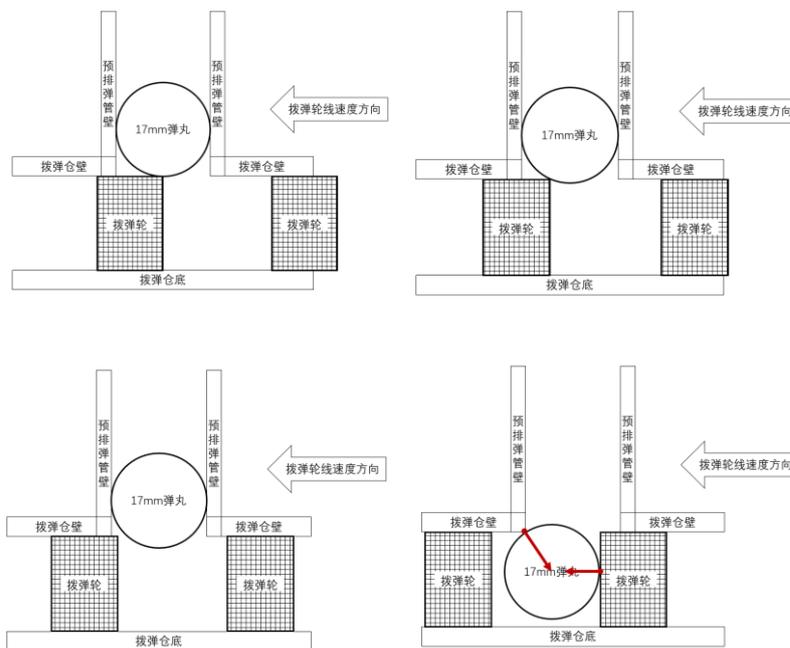
弹丸下落过程分为四步：

第一步，弹丸与拔弹轮相对滑动，弹丸竖直高度不变；

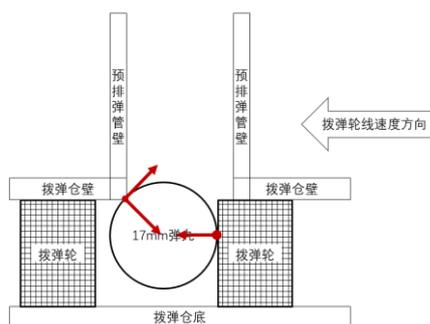
第二步，前一个拔弹叉后端越过弹丸中心，弹丸开始下落，同时被前一个拔弹叉后端限制下落速度；

第三步，弹丸由于重力加速度不足，与前一个拔弹叉分离，开始进行有初速度的自由落体；

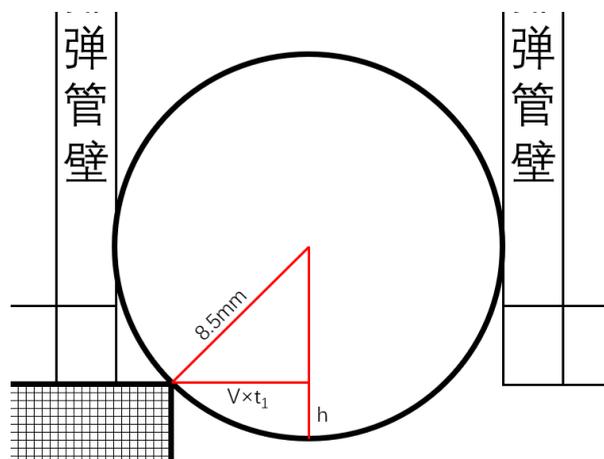
第四步，弹丸进入拔弹仓底部，或者未完全进入而被后一个拔弹叉与拔弹仓壁的相对运动挤入拔弹仓底部。



卡弹发生在第三步与第四步之间，弹丸来不及下落，被拨弹仓壁和拨弹轮卡住。



设拨弹轮线速度 v 、重力加速度 $g=9.81\text{m/s}^2$ 、弹丸宽度 $d=0.017\text{m}$ 、半径 $r=0.0085\text{m}$ 、第二步经历的时间为 t_1 、第三步经历的时间为 t_2 、弹丸与前拨弹叉分离时的竖直速度为 $v_{\text{分离}}$ 、弹丸与前拨弹叉分离时下落的高度为 $h_{\text{分离}}$ 。



$t=0$ 到 $t=t_1$ 时，下落的高度 h 满足以下函数：

$$h(v, t) = r - \sqrt{r^2 - (vt)^2}$$

对 h 关于 t 求二阶偏导，得到第二步中的各个时刻的加速度。

$$a(v, t) = \frac{\partial^2 h(v, t)}{\partial t^2}$$

第二步到第三步， $t=t_1$ ，即弹丸与前拨弹仓分离时，

$$a(v, t_1) = g$$

此时，弹丸垂直下落的速度 v_y 为

$$v_y(v, t_1) = \frac{\partial h(v, t_1)}{\partial t}$$

第三步，弹丸作初速度为 $v_{\text{分离}}$ ，加速度为 g 的自由落体。此时下落的高度与时间的关系为：

$$h(v, t) = h_{\text{分离}} + v_{\text{分离}}t + \frac{1}{2}gt^2$$

经过实验，弹丸还有 3mm 未进入拨弹仓时不会被夹住，即 $h(v, t) = d - 0.003m$ 时进入第四步。所经过的总时间为

$$t_{\text{总}} = t_1 + t_2$$

经过测量，弹丸完成整个运动时间内，拨弹轮分度圆转过的弧长为 $l = 21.2mm$ 。

所以拨弹轮的线速度最大为：

$$v = \frac{l}{t_{\text{总}}}$$

联立上述所有方程，可以解出拨弹轮最大不卡弹的线速度为 v （下图中字母不与上述方程严格对应， a 为 t_1 、 b 为 t_2 、 k 为 $v_{\text{分离}}$ 、 v 与上述 v 一致）。

```
NSolve[{a == (Sqrt[17/109] Sqrt[-2000 - 3^(2/3) - 9265^(1/3) (v^(-2))^(1/3) + 16677/v^2]) / 6000, k == (v a^2) / Sqrt[0.00007225 - a^2 v^2], 0.0055 + Sqrt[0.0085^2 - (v a)^2] == k b + 1/2 * 9.8 b^2, a + b == 0.0137 / v}, {a, k, b, v}]
```

```
[[{a -> 0.00479282, k -> -0.000775357, b -> -0.0531645, v -> -0.283223}, {a -> 0.0353587, k -> 0.0356439, b -> 0.0449155, v -> 0.170665}]]
```

数值代入公式计算过程

$v=0.17065m/s$, $h_{\text{分离}}=0.00256m$, 符合实际情况, 将线速度转换成转速 RPS 约为 1.0822R/s, 由于拨弹轮为 5 齿, 乘以 5 得拨弹速度为 5.411 发/秒, 与实验高度吻合。

通过验证我们可以得出结论：预排弹减少了空弹的发生，但也把拨弹轮的最高有效转速限制在了 1.1 圈每秒。如果分度圆大小不变，拨弹轮的最高稳定射频与拨弹轮齿数正相关，系数为拨弹轮的最高有效转速，受到结构设计的限制。所以我们可以通过增加拨弹轮齿数来直接增加射频，只是齿数增加也会增加拨弹轮的体积和质量卡弹概率。也可以改变预排弹的方式，增加弹丸可以下落的时间，增加有效转速和提高射频

2.4 尝试与过渡

第三代拨弹机构（2019.3 完成）

关键词：供不应求的弹丸，分隔弹仓，预排弹，拨弹轮间距修改的尝试。

当弹仓中发生弹丸堆叠自锁或是拨弹轮转速过快的时候，就会发生拨弹轮中弹丸供不应求的情况，也就是空弹。现在我们已经有了一个稳定的拨弹轮，那就来解决这个空弹的问题吧。

预排弹：目标是通过机械结构自动将弹仓内弹丸有序化，以便快速进入拨弹轮。例子：供弹系统中存在由于弹仓形状设计问题，弹仓中的弹丸未能及时补充入拨弹轮的问题。这里的解决思路是利用圆柱形管道对弹仓内弹丸进行储弹和预置，利用步兵行走的射击空窗期的移动晃动,使弹仓中弹丸进入圆柱形管道，排列弹丸，自行对弹丸预置。

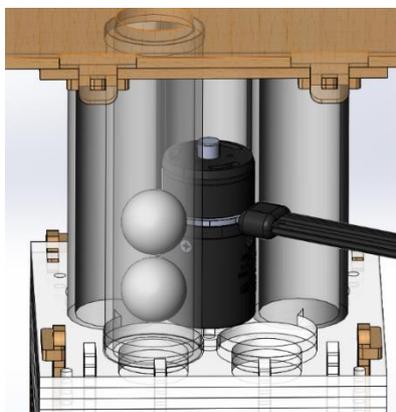


图 16.预排弹示意图

预排弹效果图有视频与 GIF 图片演示。预排弹会出现按次序把每一根管内的弹丸打空的现象。实验结果是不会出现空弹，因为弹丸会以最快的速度补充进拨弹轮。多次实验后，该设计的拨弹稳定射频确定在 5 发每秒，这时不会发生空弹卡弹。这也就是第二代拨弹机构的测试数据。卡弹分析如第二代卡弹分析。

结论：在一定射频以下，预排弹能避免空弹情况的发生。

但是卡弹的概率由于预排弹管的存在也相应增加。当射频增加，拨弹轮转速增加，卡弹频率也随之增加，电机反转的耗时也降低了拨弹机构的平均射频。在第二代拨弹机构中稳定射频是 5.2 发每秒，而第四代拨弹机构增加了预旋转后稳定射频可达 15 发每秒。预排弹管的高度是由预置弹丸的数量决定的，如第四代拨弹机构设计。10cm 的预排弹管加上预旋转，可以预置 42 颗弹丸。就是说可以保证 42 颗以上的弹丸高速连发。



图 17.GIF.预排弹效果图

分隔弹仓：分隔弹仓的设计来源于另一个设计，弹丸缓冲板。弹丸从补给站下落到弹仓会发生反弹弹出，下供弹尤其明显。一般在弹仓底增加缓冲材料来减少反弹。但是弹丸堆积之后，缓冲效果不佳。然后我就在弹仓中间加了一块缓冲横板：弹丸落在横板上获得缓冲并进入弹仓，而后续的弹丸仍然可以获得缓冲，从而解决这个问题。

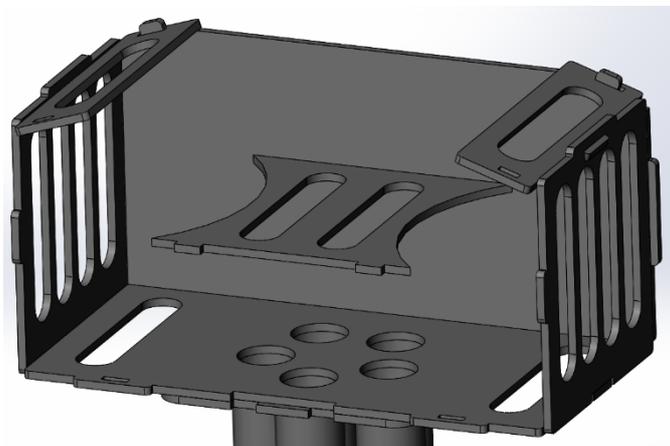


图 18.中间板为缓冲横板-陈松斌同学绘制

【拨弹轮弹丸供不应求】而另外一个问题是大量弹丸形成稳定结构，如 1.2 所述，弹丸无法及时进入拨弹轮内造成空弹，甚至卡弹。我们的解决方法是分隔弹仓。

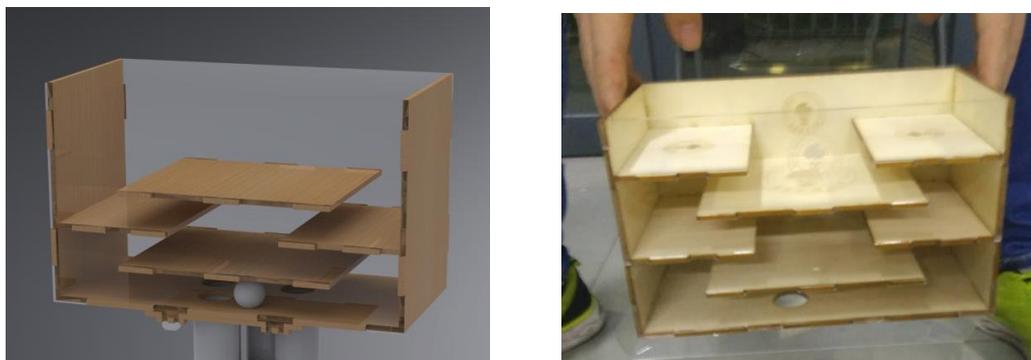


图 19.分隔弹仓



图 20.GIF 分隔弹仓测试

分隔弹仓在弹丸缓冲板的基础上**继续增加了隔板**，目的是把堆积在一起的弹丸【切开】成单层。这样单层的弹丸就可以在分开的隔板间**自由滑移**，顺利进入拨弹轮或是预排弹管。底盘只要有加速运动，弹丸就会滑移，不会发生弹丸卡在弹仓里的情况。这里无论是哪种拨弹轮和弹仓，都可以在拨弹轮上方 18mm 处增加一块隔板，使最底一层弹丸能够自由滑移，那么弹仓卡弹就可以避免。另外，拨弹轮半径越大，弹仓卡弹的概率越小。

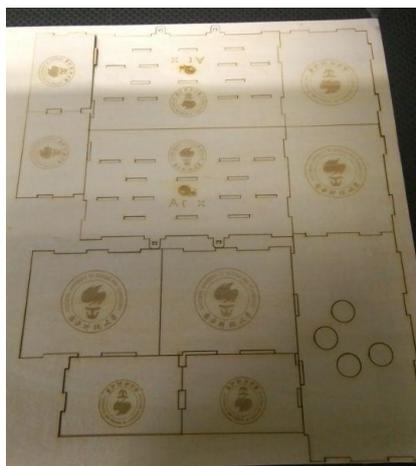
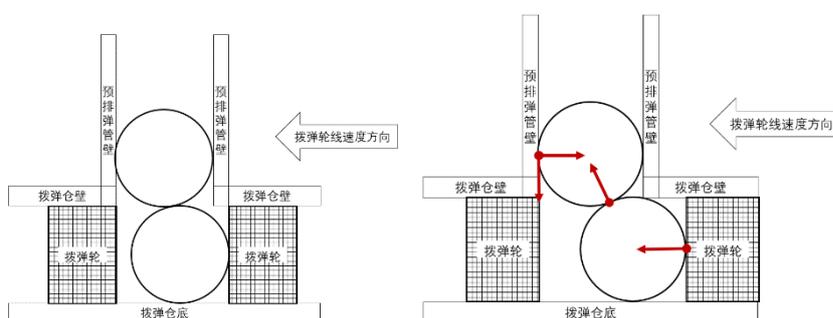


图 21.分隔弹仓的制造：激光切割

拨弹轮间距修改：一个不可行的修改

第二代拨弹轮公式虽然稍微复杂，可是最终解出拨弹速度的方程可以很容易地按照等式两边分成两块，一边是在重力下弹丸进入拨弹轮的总时间 (t_1+t_2)，与拨弹轮线速度速度 v 有关，当 v 增大时，趋向于弹丸自由落体 14mm 的时间，一边是拨弹轮旋转中给予弹丸下落的时间 $[(r+0.0042)/v]$ 。所以，自然而然地想到，从较为简单的右边下手，如果提高拨弹轮允许弹丸下落的距离，即可给与弹丸更多的下落时间，从而获得更高的拨弹速度。

基于这种想法，我们增大了拨弹轮拨叉之间的间距，并且配上更高的旋转速度，结果发现卡弹的情况更加频繁。再次分析之后，我们发现自己思维漏洞。



左边为增大宽度后,右边为增大宽度前。在第一颗的弹丸下落完成之后，不能阻挡第二颗弹丸进入旋转区域，导致两颗弹丸之间自锁被夹住，最终导致卡弹。

所以，通过增大拨弹轮拨叉之间的宽度来加快射频是**不可行的**。

2.5 突破：从 5 发每秒到 14 发每秒

第四代拨弹机构（2019.6 完成）

关键词：U 形隔板的过渡，多层预置，预旋转。

14 发每秒的五齿拨弹轮采用的是【预旋转】的方案，U 型板方案由于其加工制造难度，仅作为一个思想过渡。

2019 南部分区赛结束后，我们继续对拨弹机构进行迭代。

尝试过在等式的一边（增加拨弹轮旋转中给予弹丸下落时间 (t_1+t_2) ）做迭代修改并且碰壁后，我们想到了在等式的另一边下功夫，缩短弹丸下落的时间。

我们先回顾一下拨弹轮下落公式的前提假设：

一枚 17mm 弹丸由于拨弹轮顶平面阻挡无法下落而静止在拨弹轮顶平面上，并且：

- ① 由于拨弹轮与弹丸之间摩擦力主要使弹丸旋转，该摩擦力可以被忽略，即拨弹轮与弹丸绝对光滑；
- ② 由于拨弹轮线速度较低，可以认为拨弹轮与弹丸产生的碰撞为完全非弹性碰撞；
- ③ 在实验中未发现除预排弹出口外其他位置有卡弹现象，可以认为其他位置不卡弹。

那么，这种假设计算出来的时间是否是弹丸下落的最短时间呢？显然不是，如果弹丸在与拨弹轮接触之前已经具有了一定初速度，或者再进一步，直接假设弹丸在下落前便与拨弹轮转速相同，显然这个状态下弹丸下落时间将取得最小值，即弹丸自由落体 14mm 的时间，在重力加速度限制下，每个拨弹轮空隙的进弹时间已经达到上限。为了让弹丸与拨弹轮旋转同步，我们提出让预排弹管一同旋转起来，再经过一定的简化，我们构想了这样子的一种拨弹轮雏形。

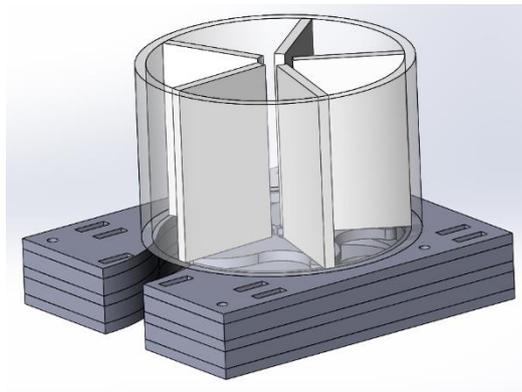


图 22.将预排弹管变成可随拨弹轮旋转的隔板

简单分析之后就发现这样子的拨弹轮并没能解决卡弹的问题，因为在上方弹舱出弹处，弹丸会被预置弹板夹住而出现卡弹。换句话说，虽然预置弹到拨弹轮的过程中不卡了，但是

只是因为我们把卡弹的位置从底下平移到了顶上，是一种掩耳盗铃的解决方案。

然而这并不代表这个方案被否决，经过头脑风暴，我们几乎同时想到了这样的方案，如图 23:

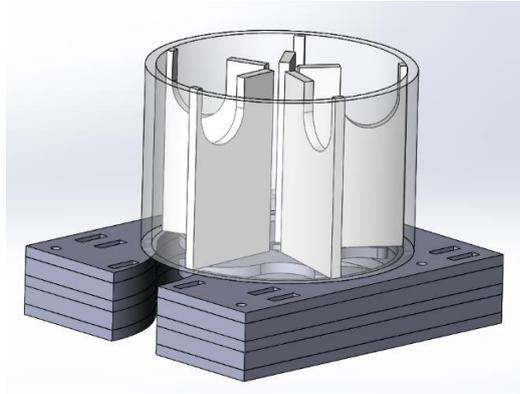


图 23.U 形隔板来排列弹丸，同时让预置的弹丸与拨弹轮同步旋转

我们将这个方案称作 **U 形隔板拨弹轮**，因为其上方有一个 U 形的缺口。在拨弹轮高速旋转时，缺口能够容下一枚弹丸，所以弹丸不可能被拨弹板和弹舱出口夹住，未落下和未与拨弹轮转速同步的弹丸将会滑动通过 U 形缺口进入下一个预置弹区间内。在 U 型缺口壁和下方弹丸的摩擦力作用下，最终下落到拨弹轮底部的弹丸将会与拨弹轮旋转同步，获得最短下落时间。

进一步分析我们发现这个拨弹轮构型还顺便解决了顺序供弹的问题，在之前的拨弹轮中，虽然有多管预置弹丸，但是弹丸只会从最远离出弹口处那一管开始进入拨弹轮并且阻止较近的弹丸下落，在旋转中只要有一处卡弹整个拨弹轮就会卡死，相当于并没有利用到拨弹轮的五个叶；五管弹是【与】的关系。而我们发现这个构型中弹丸由于 U 形缺口的存在，能够滑动到任意地方再掉落，在旋转中会自动找到不满弹的地方并填充进去，实现了随机掉落的效果而且多个孔一齐下落互不干扰，五管弹是【或】的关系。

这个时候，弹仓每一个孔的进弹速度是相互叠加的，打破了原来核心中右边拨弹轮旋转导致的限制，而每一个孔的下落时间仅为自由落体 14mm 的时间：

$$t = \sqrt{\frac{2s}{g}} = \sqrt{\frac{2 \times 0.014}{9.81}} = 0.053s,$$

即每个孔的进弹速度为：

$$\frac{1}{t} = 18.72 \text{ 发/秒,}$$

而一共有5个孔,则这种拨弹轮达到的最大理论速度为惊人的 $18.72 \times 5 = 93.59$ 发/秒。

然而,这种拨弹轮存在制造难度大的问题,不能简单地通过 LOM 制造,通过 3D 打印等方法又可能存在强度问题,电机安装位置,拨弹板设置等问题都还未解决,只是一个很初步的雏形,所以最终没能制作出实物。但是 U 形供弹的想法以及模拟推算带来的结果是诱人的,我们对这个想法进行重新分析,希望能重构这个想法。

在 U 形拨弹轮的拨弹过程中,弹丸从无初速度下落到与拨弹轮同步旋转最终与被下方推出,实际上经历了我们称为预旋转的过程。在预旋转过程中,弹丸未与拨弹轮同步旋转,而在 U 形板空隙和下方弹丸的摩擦力作用下逐渐加速直至与拨弹轮转速同步并且进入到旋转过程。旋转过程中弹丸与拨弹轮同步旋转,并且自由落体到拨弹仓底部被拨弹轮推出。

与之对应的,原来的 U 形隔板拨弹轮可以分为预旋转层与旋转层,如图 24:

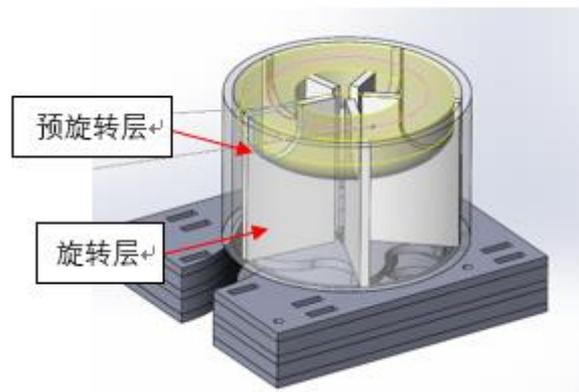


图 24.黄色部分为预旋转层,弹丸未同步;白色隔板为旋转层,弹丸与拨弹轮同步旋转

参照方形供弹管的设计思路(将在之后开源),只需要三点即可定义一个圆作为弹丸截面限位,所以如果直接采用方形代替 U 形缺口的半圆形部位,可以将圆角变成方形,如图 25 所示:

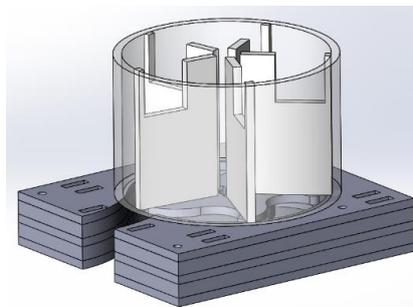


图 25.修改后的隔板方案

如果要形成方形的截面的话，LOM 就大有可为了！而且这么多层的旋转层和单层旋转层的作用效果应该相同，只保留最后一层出弹的旋转层。

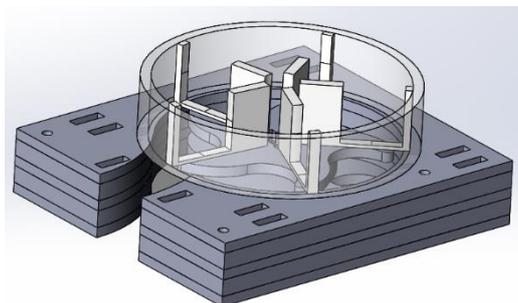


图 26. 只保留最后一层出弹的旋转层

所以经过头脑风暴进一步**重构**之后，**第四代拨弹轮**诞生了：

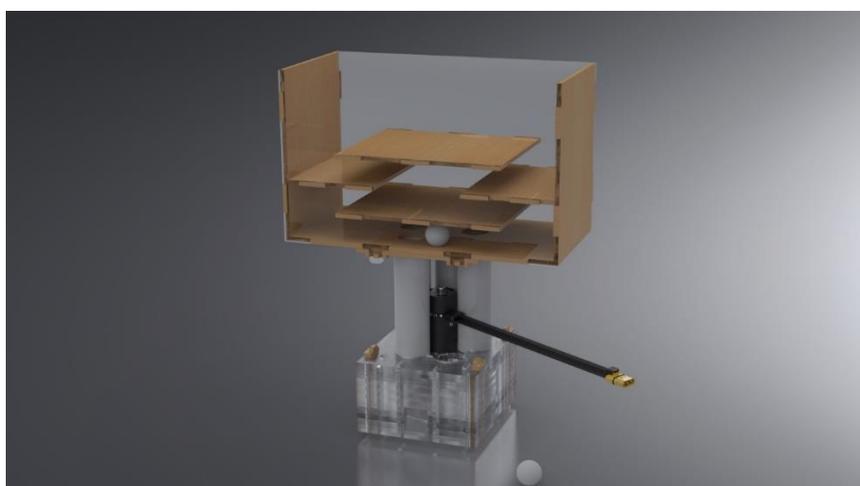


图 27.第四代拨弹轮三维建模：包含分隔弹仓，预排弹管，电机安装，预旋转层和拨弹层



图 27.第四代拨弹轮实物，左边是预排弹结构，右边是弹丸排列满的预旋转层

【第四代拨弹机构】 直接在拨弹轮上方叠加一层**预旋转层**，原 U 形缺口外侧边成为拨弹仓一部分，内侧边成为拨弹轮的一部分用来限制弹丸。下边缘直接由拨弹轮上表面和弹丸组成。

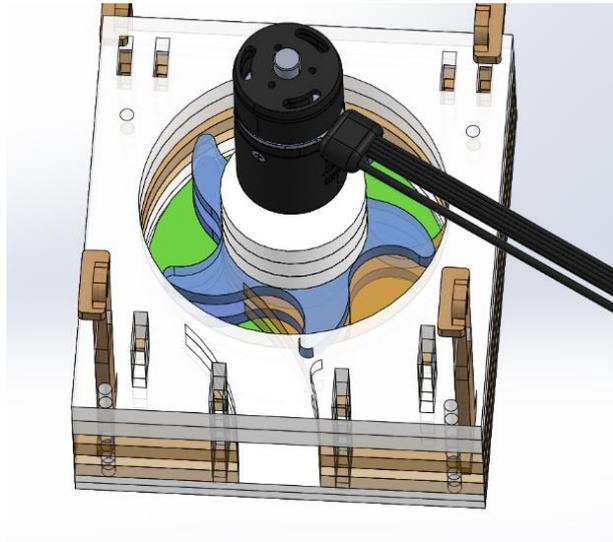


图 28.蓝色拨弹轮上边白色圆板以及相应增加的外框组成【预旋转】结构

弹丸能够在内部自由滑动，由弹丸与下层旋转层的滑动摩擦加速，当下层弹被拨出时，弹丸自然掉落进旋转层，从而避免卡死的现象。在当时我能想到的任何情况下，弹丸不会自锁卡死，而是能够在滑动摩擦作用下改变相对位置从而进入理想状态。

由于生产的材料大大简化，仅需要几层厚度不一的亚克力板通过激光切割就能做成，我们第一时间就将第四代拨弹轮做了出来。然而在实测中第四代拨弹轮仅能达到约 14 发/秒的出弹速度，和理论预测相差甚远。但仍然比五发每秒有了三倍的提升。

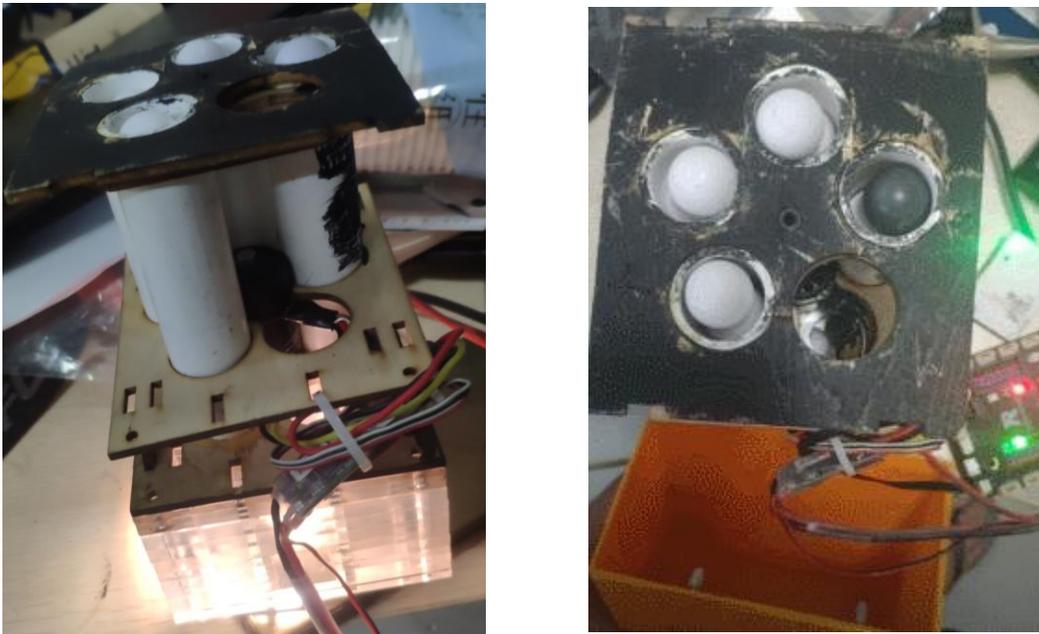
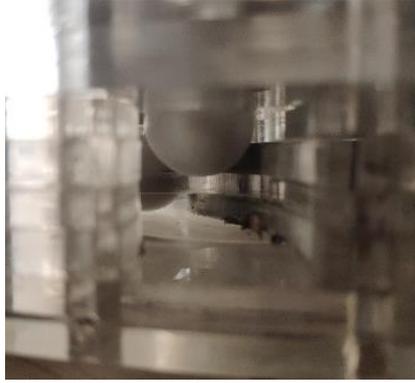


图 28.第四代拨弹机构实装&GIF 三秒四十二发拨弹

第四代拨弹轮卡弹分析

邹元浩

理论能达到最高频率为 93.59 发/秒的拨弹轮，实际上只有 14 发/秒的射速。虽然理论与实际相差得太远，可是相比与原来的 5 发/秒也有了近三倍的频率提升，让我们受到了一定的鼓舞。多次实验表明，第四代拨弹轮卡弹只会发生在一处，如图所示：



卡弹位置

预旋转层壁、上拨弹梳、上出弹梳三者将弹丸紧紧夹死，使得整个拨弹轮锁死。虽然堵转排除程序（即拨弹轮反转 0.1 秒）能够解决这个问题，但是我们认为可以在机械上进一步提高拨弹频率。

最开始认为弹丸与出弹梳碰撞直接弹出导致上方弹丸下落到一半即被卡住，于是兵来将挡、水来土掩。我们在卡弹的预旋转层与旋转层交界处添加一块 1mm 厚的薄板，薄板在拨弹仓出口向内伸出。这样的话弹丸就不会在此掉落。然而实际测试中，如果薄板伸进去的面积过大就会造成弹丸无法下落，过小就无法避免卡弹现象，甚至有些时候还会造成薄板被弹丸击打破裂的现象发生。

通过以下的计算，我们排除了之前的猜测：

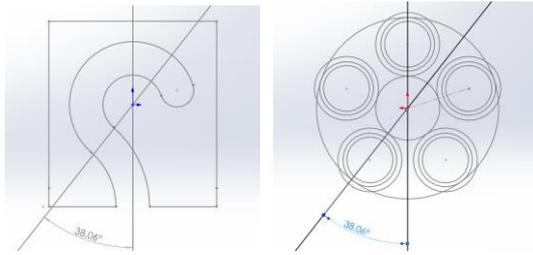
假设猜测成立，则可以由图得知弹丸下落了大约 7mm，所用的时间应为：

$$t = \sqrt{\frac{2s}{g}} = \sqrt{\frac{2 \times 0.007}{9.81}} = 0.0378 (s)$$

以极限射频 14 发/秒计算，角速度为：

$$\omega = 2\pi f = 2 \times 3.14 \times \frac{14}{5} = 17.584 (rad/s)$$

那也就是说，弹丸在离卡弹位置 $\theta = \omega t = 17.584 \times 0.0378 = 0.664 (rad) = 38.06^\circ$ 的时候开始下落。然而如图所示，弹丸在这个位置的时候前一个弹丸还没来得及从圆周中排出。说明猜测不成立。



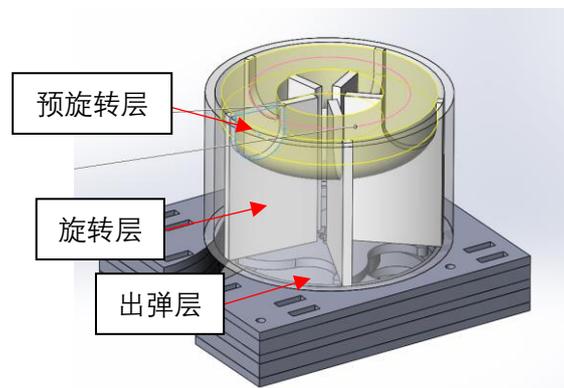
同时我们惊奇地发现这个角度刚好对应的是最后一个预排弹出口的位置,是不是就是最后一个预排弹出口进入的弹丸一定会被卡住,从而限制了拨弹轮的频率呢?我们尝试不在最后一个预排弹出口放置弹丸,然而实验结果并没有变化,说明仅仅是一个巧合。

但是我们也发现了之前思维的漏洞,在多根预排弹管同时有弹丸的时候,预旋转层整层能够被弹丸填满,此时各根预排弹管出弹的几率是相等的,也就是各根预排弹管等效。但是在只有一根预排弹管有弹的情况下,预旋转层并不能铺满弹丸即被下方拨弹层带走。在只有最后一根预排弹管有弹的时候,卡弹概率会明显提高。

【未来改进的想法】【第五代拨弹轮】:

如果采用多层预旋转层,能解决这个问题,进一步思考后我们打算直接用预旋转层代替预排弹层,这样弹丸自由掉落就可以保证底层预旋转层全是填满的状态。

还有一个假设,由于拨弹轮线速度提高,拨弹轮与弹丸之间的碰撞不能简单理解为完全非弹性碰撞,碰撞中弹丸有可能会获得向上的速度,使得下落时间延长,当刚好从某个位置开始下落时就会被夹住,对于这个假设的解决方案,我们重新研究了U形拨弹轮的结构,发现其实应该将其分成预旋转层、旋转层、与出弹层三层,如图所示。



预旋转层不直接与出弹层相连而在中间加入旋转层,能够解决弹丸碰撞导致的弹丸被夹住的问题,因为在旋转层内弹丸已经与拨弹轮同步,不会发生碰撞。所以我们加多了一层旋

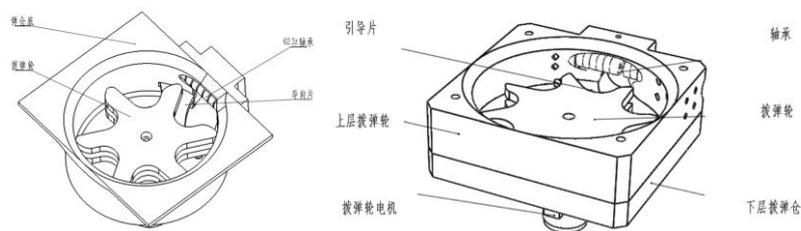
转层。尝试解决这个问题。

另外我们参考了从大连交通大学的拨弹轮开源取得灵感, 将拨弹仓出口改成一个向上的坡道同时将上方的出弹口拓宽也是可能可以的。

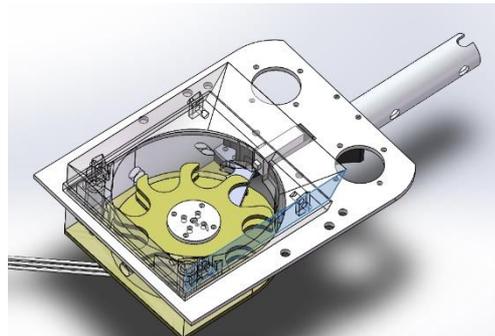
3 . RM 论坛开源拨弹机构讨论

在开源前, 我们很高兴地看到, 我们独立设计出来的拨弹轮和别的学校的开源拨弹轮有一些相同之处也有些不同之处。

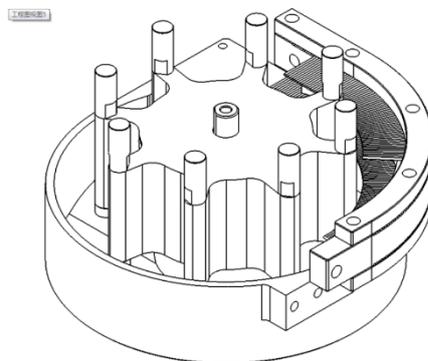
同济大学的设计报告中提到了他们的拨弹轮设计:



大连交通大学的步兵拨弹轮开源同样十分有特点:

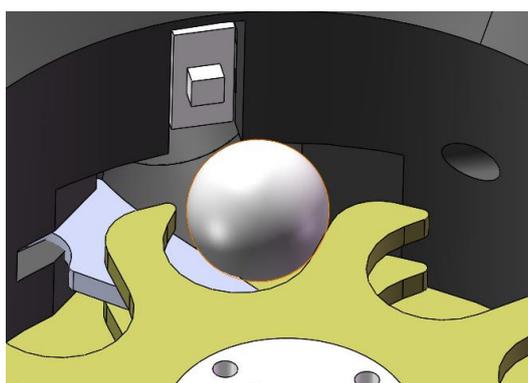


官方 RM 圆桌开源的拨弹轮也有值得借鉴的地方:



先来看同济大学和大连交通大学的拨弹轮, 由于采用了电机下置的方案, 上方的圆柱形拨弹仓其实天然形成了预旋转层, 但是由于预旋转层弹丸位置没有被限制在拨叉上方, 弹丸

与拨叉碰撞离开拨孔进入中间旋转、弹丸在拨弹轮上方进行三维堆积自锁导致空弹卡弹或者阻力突然变大的概率可能会有所增加。限制了相同拨叉数下的拨弹速度。同时，其采用的单层拨弹轮也会遇到拨轮、拨弹仓壁与出弹口上沿卡弹的问题，他们的解决方案各有不同。同济大学采用的是在拨弹仓壁上安装小型轴承来解决卡死的问题，非常简单直接，使得弹丸弹出，但是在制造上比较困难，可能需要用到大体积的 3D 打印技术或者 CNC 实现成本相对较高、而且存在阻力突变的问题。而大连交通大学的拨弹轮将出弹口做成一个向上的斜坡，并且提高出弹口开口高度使得在该位置的弹丸能够通过一定形变被拨出，如图所示。



分析大连交通大学拨弹轮卡弹位置及推测其防卡弹原理

而官方的拨弹轮的设计就非常完美了，而且和我们的设计具有异曲同工之妙。通过多层旋转层解决了空弹的问题，通过离心柱来达到预旋转的目的。与之不同的是，官方采取柔性拨弹刷的方案来避免拨弹仓与出弹结构的卡弹，而我们最终采用的解决方案是类似于大连交通大学的方案，可以使用 LOM 制造。同时由于 LOM 的特性，后期如果发现不理想我们也可以很方便地换成扰弹刷的设计，即可以在两层亚克力板中很方便地夹上毛刷。

分层实体制造 LOM 技术的引入和激光切割机的使用使得我们能够以低成本快速制造和迭代拨弹轮，这个优点是无法比拟的。

另外，由同济大学八齿拨弹轮所测得数据，换算得出拨弹轮在不卡不空的稳定射频频范围内的有效转速是接近**每秒三圈**。与我们五齿拨弹轮换算得出的拨弹轮有效转速基本一致。我们可以推测两种拨弹设计遇到的问题是一样的，如果想要提高射频，可以从上述第四代卡弹分析的假设入手尝试探索。

实际测试后，极限射频达25发/s以上，如下表所示。其中，shoot_speed_set值在8000以上时，空弹率大幅增加。

shoot_speed_set	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000	8500	9000	10000
射频(个/秒)	-	-	-	-	23	26	27	27	26	26

此时存在偶尔卡弹现象，但都可通过调整转速与反转等方式解决，可作为最终使用版本。

4.Q&A

Q: 第四代拨弹机构的重量如何?

A: 350 克。由于使用亚克力 LOM 的方法，满足了强度的同时重量也上去了。由于我们做的是下供弹，所以没有考虑重量。可以通过画减重孔的方法去减轻重量。设计拨弹仓壁的时候壁厚 2mm 的亚克力就完全可以满足要求。可以减重一半。

Q: 为什么选用亚克力?

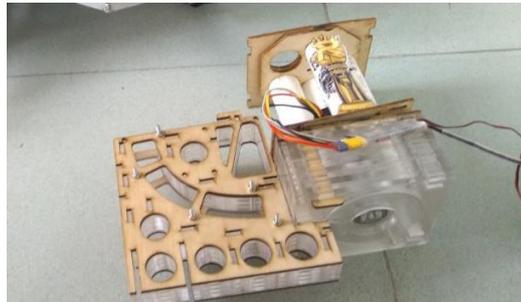
A: 第一，亚克力便于使用激光切割。第二，作为有机玻璃，透明度好，可以观察弹丸运动状态。第三，力学性能好，弹性模量大。

Q: 每次迭代花了多少时间?

A: 从想法到制造和测试，当初研究的时候，每一代基本上都是八个小时。

Q: 拨弹机构如何与机器人底盘，供弹链安装?

A: 使用定位销，可以实现快装和准确定位。



左侧的是方形下供弹链，也是用 LOM 方法制作，设计的插销可以精准稳固对齐供弹链。机器人同理。



GIF.第四代拨弹机构与方形供弹链安装实测

Q: 第四代拨弹机构在使用上的限制?

A: 这次设计是对一个下供弹的拨弹机构进行探究。对于小陀螺与上供弹，需要进行减重和对预排弹的高度进行削减。

总的来说，第四代拨弹机构的模型通用性不高，通用性高的是**设计思路与卡弹分析**。队员可以用这些设计思路去设计和分析更适合自己其他机械结构的拨弹机构，比如梳型拨弹轮，分层实体制造的思想，不卡弹的拨弹轮曲线等等，这些都是通用性比较高的。有了思路，无论上供下供，卡弹空弹，八齿十二齿就都能自己设计出来。

5.总结

到这里，近一万五千字的拨弹轮思路与设计开源就基本结束了。这里总结一下。

初入门，我们遇到了卡弹问题；

再入门，实现了梳型拨弹轮的设计；

探索，得到了一条不卡弹的**拨弹轮曲线**；

尝试，试验了**预排弹**，**分隔弹仓**和 U 型隔板思路；

突破，重构了预排弹和 U 型隔板的设计，得出**预旋转**的解决方案使五齿拨弹轮的最高射频从 5 发每秒提高到了 14 发每秒。

下一步，预排弹的管状设计还会被新的方案代替，以求更好的效果。

分层实体制造和**激光切割**的使用使我们能够进行快速迭代方案。

从入门到卡弹，14 发每秒的五齿拨弹轮和 24 发每秒的八齿拨弹轮基本满足 2019 赛季对于拨弹机构的要求。更快的射频是我们的追求。

以上就是本次南方科技大学 Raiders 学生团队拨弹机构思路与设计的全部内容。

最后附上【定义与部分名词解释】。

参考资料：

- 【1】 同济大学 Super Power 战队 RM19 设计报告开源：
<https://bbs.robomaster.com/thread-8019-1-1.html>(出处: RoboMaster)
- 【2】 大连交通开源之拨盘供弹：<https://bbs.robomaster.com/thread-6914-1-1.html>(出处: RoboMaster)
- 【3】 厦门大学嘉庚学院&厦门大学联队【步兵机械开源】
<http://bbs.robomaster.com/forum.php?mod=viewthread&tid=6815&fromuid=14>
(出处: RoboMaster)
- 【4】 「RM 圆桌」第十二期 拨弹机构的秘密：<https://bbs.robomaster.com/thread-8461-1-1.html/>

感谢

感谢 RoboMaster 论坛平台以及各个大学参赛队的开源分享。我们从中获益良多。

感谢团队成员的在这个项目里的参与和付出。

团队成员：汤兆恒，邹元浩，汪炜，吴迪，王子瑞，陈松斌，储鹏，杨照基，毛尊尧，吕祥文，成杰，张宇阳，易沐霖，李子奕，许博添，吕浩然，荆泳霖，罗琪琛。

指导老师：李斯明。

定义以及部分名词解释

拨弹轮：RM 赛场上的拨弹轮基本上是指能够通过重力作用装填，通过多个拨轮齿与多个弹丸硬接触将弹丸通过旋转加速到一定速度从而推出弹舱的推入供弹链或者直接推入摩擦轮的结构。

梳状多片拨弹轮：多片拨弹轮与拨弹仓导向曲线的板材形成梳状交错运动的拨弹轮结构。

导向片：拨弹轮结构中用于把弹丸导向离开拨弹轮的结构，即压弹片。

卡弹：指弹丸因碰撞，挤压，摩擦等外力因素无法被拨弹机构拨离拨弹仓或无法在供弹链中前进。

拨弹轮转盘：通过梳状拨弹轮得以实现。弹丸落入空位后如同骑上旋转木马，弹丸底部与拨弹轮底盘相对静止被电机带动旋转，弹丸底部不会产生运动方向上的滑动摩擦，降低弹丸与拨弹仓底面摩擦挤压卡弹风险，降低拨弹仓所需加工精度。

稳定射频：指拨弹机构满足不卡弹不空弹的条件下，单位时间内连续拨出弹丸的数量。单位：颗每秒。实际值一般采用连续拨出 50 颗弹丸，计时，求平均射频值来得出。

预排弹：通过机械结构自动将弹仓内弹丸有序化，以便快速进入拨弹轮。例子：供弹系统中存在由于弹仓形状设计问题，弹仓中的弹丸未能及时补充入拨弹轮的问题。这里的解决思路是利用圆柱形管道对弹仓内弹丸进行储弹和预置，利用步兵行走的射击空窗期的移动晃动，使弹仓中弹丸进入圆柱形管道，排列弹丸，自行对弹丸预置。

预旋转：弹丸未与拨弹轮同步旋转，而在预旋转层中受摩擦力作用逐渐加速直至与拨弹轮转速同步并且进入到旋转层过程。

分层实体制造 (LOM)：板材三维打印。与机器人比赛中常用的三维打印(熔丝制造 FDM, 数字光处理 DLP) 原理类似。都是通过将数字三维模型切片，降维成易于加工的二维图纸。打印机通过读取文件中的横截面信息，用液体状、粉状或片状的材料将这些截面逐层地打印出来，再将各层截面以各种方式粘合起来从而制造出一个实体。分层制造，逐层叠加。

而分层实体制造与 FDM, DLP 等不一样的是，它可以使用薄膜，板材等材料，不必拘束于几种低熔点塑料的限制。LOM 的原理是先将板材按照横截面生成的二维图纸，利用激光切割机切割板材，然后通过连接件或热熔胶，将各横截面堆叠排列，制成实体。

相比于 FDM, 优点：1.制件精度高。板材表面方向可保持原有性质，例如光滑。切割方向上的精度由于激光切割也会比一般 FDM 要高。而堆叠方向上的精度由板材厚度决定。2.无需额外表面处理。因为不需要设计和制作支撑。3.快速成形。有激光切割机或雕刻机的学校和战队，可快速制成适合 LOM 制造的工件。4.成形件的力学性能较高。由于扩充了三维打印材料的范围，力学性能更好的但是难以熔丝制造的材料也可以进行三维打印。耐高温，熔丝制造工件不耐高温。

适用板材：亚克力，PP 板，轻木，层板等。并且可以对单个截面制成的板材工件独立进行精加工，加工方便且细致。还可以板材混搭，获得更好的机械性能。

适用：熔丝制造不满足光滑或力学性能的工件，且没有过高机械性能要求的 CNC 加工的工件。快速测试 CNC 实体配合。堆叠方向精度要求与板材厚度相关。

分隔弹仓：用隔板把弹仓中堆积的弹丸分隔成单层的弹仓设计结构。以求解决弹丸在弹仓与拨弹轮之间卡住的情况。