

滑板抵达待装填位置，拨弹滑板上的拨弹齿弹起带动弹链，拨弹滚轮被拨弹杠杆带动下压，此时执行装填动作，拨弹板开始带动弹链运动。当拨弹滚轮抵达 D 位置时，装填动作结束，弹链中的下一发链节抵达炮口正中心，拨弹滚轮被凹槽卡住，向待击发位置运动，准备进行下一次射击。具体运动过程如图 3 所示，拨弹滚轮运动顺序为 $A-B-C-D-A$ 循环。

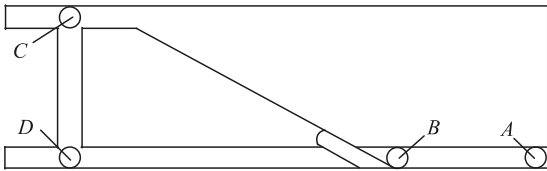


图 3 复进板与拨弹滚轮的位置关系

拨弹板与拨弹滚轮由转动副连接，其构造为一整块主体结构附加 2 片拨弹齿。在拨弹滚轮由 B 点前往 C 点的过程中，拨弹板被其带动运动，其侧面结构下压解锁阻弹齿，弹链被解锁，能够被拨弹片带动；此时拨弹板在前往复进开始的位置途中，拨弹齿被弹链压下，因其单向弹簧结构在此过程中不会出现阻碍，当拨弹板抵达复进开始的位置(即图 3 中 C 点)时，拨弹齿被弹簧弹起，带动弹链运动。

拨弹机构结构如图 4 所示，其中中轴纵向排布的 2 片为拨弹齿，横轴对称排布的 2 片为阻弹齿。

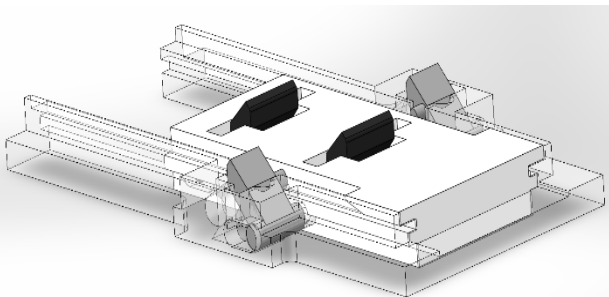


图 4 拨弹板 3 维建模

该自动机循环过程中的拨弹滑板与复进板运动规律如图 5 所示。

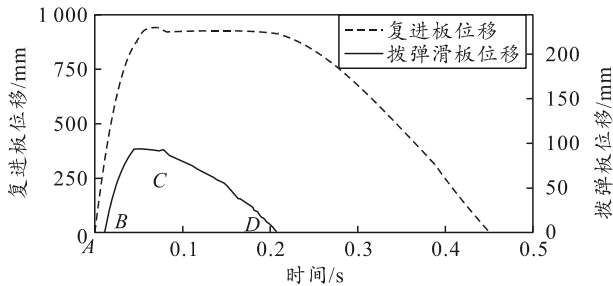


图 5 复进板与拨弹滑板位移关系

图 5 中标明的 $ABCD$ 点时刻分别与图 3 中的点位置对应：在 A 点时刻，火炮击发，复进板随炮门

运动，当抵达 B 点时，拨弹滚轮被复进板抬起并带动拨弹滑板开始运动，此时复进板随炮门一同进行后坐运动；在 C 点时开始拨弹运动，此时复进板被卡锁卡住，停止不动，拨弹滑板进入接近匀加速直线运动的过程，直至抵达 D 点，拨弹滚轮进入复进轨道，拨弹板停止运动，复进板开始复进运动，当复进板再次抵达 A 点时，一个循环结束。

此结构优势在于能够降低火炮后坐力，达到轻量化火炮的目的；缺点在于装填过程与复进过程不同步，提高了复进时间。

1.2 自动虚拟样机的建立

基于该炮结构特点，分别建立复进动作与填弹动作的 SolidWorks3D 模型，然后将模型导入 Adams 仿真软件中如图 6 所示，建立力学分析模型进行仿真。

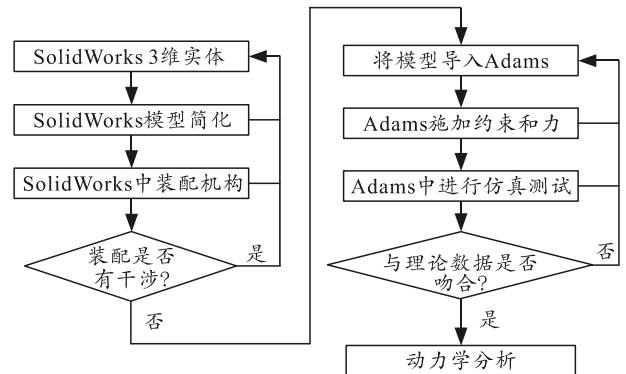


图 6 将 SolidWorks 模型导入 Adams 的过程

由于原版 SolidWorks 模型较为复杂，因此需要进行简化，选择其中与装弹运动相关联的部分，分解为：1) 由炮门合力推动的复进将拨弹滚轮抬起；2) 与拨弹滚轮带动的拨弹板将炮框(即弹链)拨动进行复进的过程。考虑到实际仿真过程中 2 部分的互相影响，将其在同一个模型中进行仿真以得到更准确的结果^[3]。

检查零件在转化后的效率。由于自动机结构较为复杂，切换后可能导致在部分复杂结构边界上的特征节点丢失，并由此使模型结构产生偏移，这时就需要对已导入 Adams 中的模块加以修复。另外，在转换模式的过程中必须注意 2 种软件各自选择的时间单位要相同，并对模型的物理特性进行检查(如物理特性有丢失则可在 Adams 中重新指定)。把 2 部分在 SolidWorks 中调整为同一个运动方式，然后依次输入同一个 Adams 模块中，通过使用各种力和约束，即可形成自动机或虚拟样机模型。建立的虚拟样机模型如图 7 所示^[4-6]。

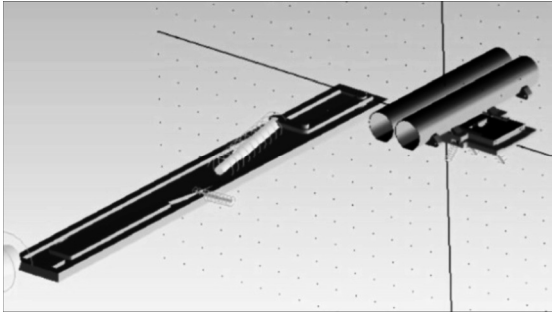


图 7 Adams 虚拟样机模型

1.3 刚柔弹链

火炮的弹链是将炮弹连接在一起的装置，可以提高装填速度和减少人工操作。根据弹链的材料和结构，可以分为刚性弹链和柔性弹链 2 种。刚性弹链是用金属或塑料制成的固定形状的弹链，柔性弹链是用金属或纤维绳等材料制成的可弯曲的弹链。2 种弹链各有优缺点。

1) 刚性弹链：优点是结构简单、稳定性好、不易变形或断裂、适合高速装填和高温环境；缺点是重量大、体积大、占用空间多、不易存储和运输，需要专门的装卸设备。

2) 柔性弹链：优点是重量轻、体积小、占用空间少、易于存储和运输、可以手动装卸；缺点是结构复杂、稳定性差、容易变形或断裂、不适合高速装填和高温环境。

采用刚柔弹链，既可以做到占用空间小、方便储存与运输，又能做到使用时不易变形或断裂，兼具了 2 种弹链的优点。

设计采用刚柔弹链，当弹链位于正常状态时，由弹链末端的弹簧拉住，依靠拉紧力固定弹链，围绕拨弹板后的底板运动，形成柔性弹链；当单节链节进入最后 3 发炮弹的位置时，弹框被上方滑槽固定，形成刚性弹链，如图 8 所示^[7-8]。

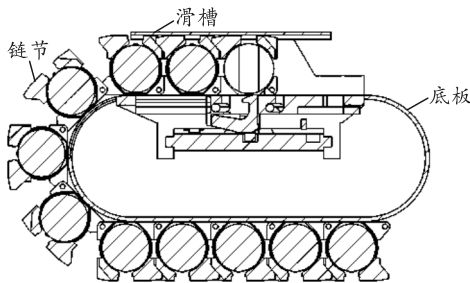


图 8 刚柔弹链

2 虚拟样机的仿真分析

采用 89 式 60 mm 迫击炮作为炮身，输入量为膛底合力实测数据，以此为基础展开仿真分析。将

膛底合力数据转为 Spline 样条函数曲线输入 Adams 模型中，将自变量设为 time，导入复进板的移动副作为 force，并在样条曲线的截止时刻设置截止函数，即可得到输入量，如图 9 所示。

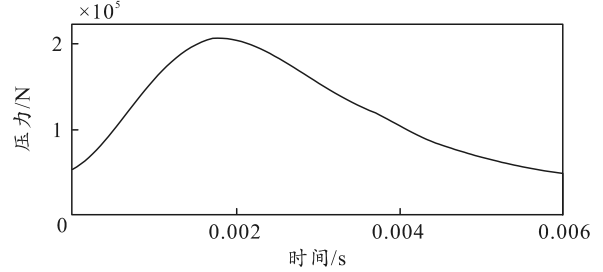


图 9 输入量：膛底合力 p-t

身管复进簧弹簧力的大小随弹簧压缩量按线性规律变化。对于一般火炮而言，后坐长度就是弹簧压缩的增量，复进力随后坐长度的变化规律可写为：

$$F_f = F_{f_0} + Kx \quad (1)$$

式中： F_{f_0} 为复进簧预压初力； K 为弹簧的刚度系数； x 为后坐行程。当后坐终了时， $xl = \lambda$ ，复进簧末力为：

$$F_{f_\lambda} = F_{f_0} + Kl\lambda \quad (2)$$

若定义弹簧末力 F_{f_λ} 与初力 F_{f_0} 之比为压缩比 C_m ，则

$$C_m = F_{f_\lambda} / F_{f_0} = (F_{f_0} + Kl\lambda) / F_{f_0} \quad (3)$$

弹簧的刚度系数可写为

$$K = C_m \frac{(C_m - 1)F_{f_0}}{l_\lambda} \quad (4)$$

复进簧初力由下式确定：

$$F_{f_0} > mhg(\sin(\varphi_{\max}) + f\cos(\varphi_{\max}) + \nu) = amhg \quad (5)$$

把膛底合力、弹簧力、冲击力、摩擦系数及其各种阻尼的约束施加在动力学模型上，再经过模拟运算即可得到某武器在发射后整个自动机各部分的运动状况，如：炮闩的速度、位移曲线，以及拨弹板的速度、位移曲线和复进阻力曲线等。

由于采用刚柔耦合弹链的结构，在炮弹发射过程中会逐渐损失质量，因此分别计算不同数量炮弹情况下的拨弹板位移-时间曲线与速度-时间曲线，如图 10 和 11 所示。

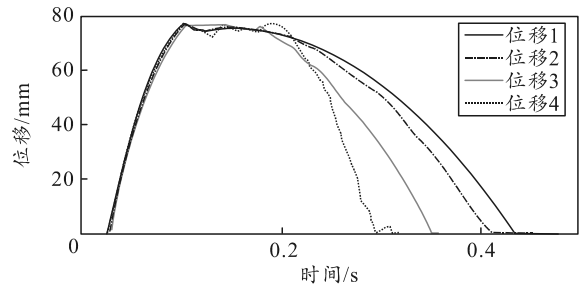


图 10 拨弹板位移-时间曲线

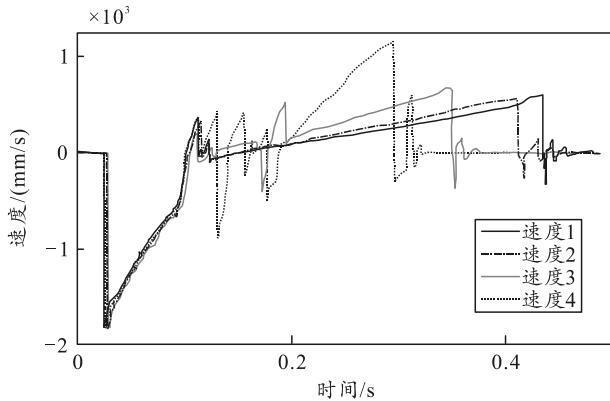


图 11 拨弹板速度-时间曲线

在图 10 和 11 中，位移与速度 1、2、3、4 分别指弹链中存在 11、10、7 和 1 发炮弹时，拨弹板的运动规律。根据图中曲线可知：随着火炮逐渐发射，拨弹板最大速度升高，拨弹过程加快，装弹机的装填速度逐渐上升，即随着炮弹逐渐发射，装填速度越来越快。该结果符合预期。

在一个运动过程中：炮弹击发，炮膛合力作用于炮闩，使得与炮闩固定的复进板快速被推向后，沿复进板轨道运动的联动桩被滑道推至上方，带动拨弹板运动。联动压下阻弹齿，解锁弹框，拨弹齿被拨至第 2 发炮弹的弹框后方，随后复进板被限位，拨弹滚轮在限位的范围内产生震荡。此时拨弹滚轮在复进板的末端轻微震荡，产生一定时间的延迟；随后滑入复进轨道，拨弹板上的拨弹齿触碰到弹链，进入平稳运动过程，抵达终点时停下，拨弹滚轮滑入复进滑槽，进入复进运动，准备发射下一发炮弹^[9-10]。

运动前后拨弹板与弹链的位置关系如图 12 和 13 所示。

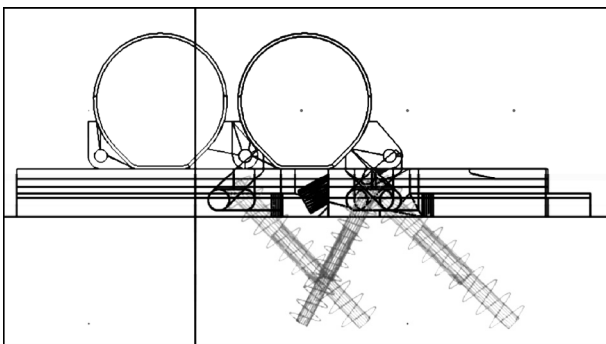


图 12 装弹前位置关系

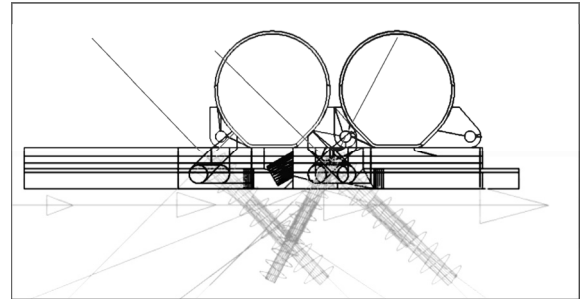


图 13 装弹后位置关系

3 结束语

笔者探讨了迫击炮自动机的结构与运动仿真，建立了该自动机的 3 维建模与动力学模型，对刚柔弹链进行了设计论证与建模，对自动机发射动力学模型的运动规律进行了力学仿真验证，得到了满意的结果。

参考文献：

- [1] 李广威, 余璇, 沙彬龙, 等. 迫击炮自动前装填机构动力学仿真与分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2020, 41(4): 49-52, 79
- [2] 胡涛, 王瑞林, 张军娜. 某车载速射迫击炮自动机动力学建模仿真[J]. 兵工自动化, 2019, 38(4): 66-70.
- [3] 曾晋春, 杨国来, 王晓锋. 某火炮自动机虚拟样机建模与仿真[J]. 火炮发射与控制学报, 2008(1): 42-45.
- [4] 王镒磊, 姚养无, 李树军, 等. 基于 ADAMS 的冲锋枪动力学仿真分析[J]. 兵工自动化, 2023, 42(5): 78-81, 87.
- [5] 姚养无, 王刚, 师翼. 弹簧液压式延迟后坐枪机的动力学仿真[J]. 兵工学报, 2008, 29(5): 518-520.
- [6] 李杰仁, 马吉胜, 陈明, 等. 基于 ADAMS 的自动机动力学建模与仿真[J]. 计算机仿真, 2010, 27(10): 246-249.
- [7] 满孝杰, 郝秀平, 焦健. 基于 ADAMS 的某链式机枪自动机动力学仿真研究[J]. 机械设计与制造工程, 2021, 50(1): 25-28.
- [8] 彭峰生. 弹链力学性能研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2002(3): 25-29.
- [9] 信义兵, 高跃飞, 徐凤军, 等. 基于 ADAMS 某链式回转弹仓的仿真分析[J]. 机械工程与自动化, 2015(3): 81-82, 84.
- [10] 李晓彤. 35mm 双管转膛自动机总体设计与动力学仿真[D]. 太原: 中北大学, 2016.