

doi: 10.7690/bgzdh.2016.08.007

某新型自动发射系统动力学仿真研究

史亦超, 王永娟

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为了探索武器设计参数对自动机运动特性的影响, 以某新型自动发射系统为研究对象进行模拟和动力学仿真研究。在已有三维模型的基础上建立该系统的多刚体动力学模型, 运用 ADAMS 软件, 对自动机的运动学和动力学进行仿真, 验证自动机动作的可靠性; 根据本发射装置曲直兼容、点面杀伤及枪管双向缓冲等特点, 分别建立发射 2 种不同弹药(穿甲弹和榴弹)和有无前冲击发的工况模型, 分析自动机运动特性, 验证其兼容发射特性; 通过改变设计参数值, 得出参数变化对自动机运动的影响规律。结果表明: 武器设计参数对自动机运动规律的影响并不成特定的规律, 设计者需综合分析各参数变化对其运动特性的影响, 寻求最佳参数匹配方案。

关键词: 曲直兼容; 前冲击发; 虚拟样机; 动力学/动力学分析

中图分类号: TJ25 **文献标志码:** A

Dynamic Simulation of A New Automatic Launcher System

Shi Yichao, Wang Yongjuan

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: For research influence of weapon design parameter on automata dynamic feature, take a new automatic launcher system as research object to carry out simulation and kinematics simulation research. Based on current 3D model, establish system multi-rigid-body dynamic model, use ADAMS software to simulate kinematics, and verify reliability of automata movement. According to the transmitting device of the curved & direct compatibility, point & area denial effect and the double-acting shock absorber of the barrel, and the emission of two different ammunition (wearing a bomb and grenades) and no shock front conditions model, automata motion characteristics analysis, verify the compatibility emission characteristics; by changing the design parameters that the influence of parameter changing to the automaton movement. The results show that the influence of the weapon design parameters on the motion law of the automaton is not a specific law. The designer must comprehensively analyze the influence of the parameters on the motion characteristics, and find the best parameter matching scheme.

Keywords: curved & direct compatible; advancing primer ignition; virtual prototyping; kinematics/ kinematics analysis

0 引言

随着军事技术的不断发展, 传统作战形式也在漫长的历史进程中不断演变。现代战争的作战形式由传统的“线性作战”向“非线性作战”转变, 步兵战术正逐步向“非接触式战术”转变^[1]。美国在理想班组武器(OCSW)系统中提出“2 000 m 内有高命中率和杀(毁)伤率, 配备爆炸弹、动能弹或复合作用弹, 主要对付集群有生目标、轻型车辆和防御工事内的敌人, 也可对付轻型装甲车和低速空中目标”等作战性能要求, 这也是我国班组武器的发展方向^[2-4]。笔者研究的新型自动发射系统就是针对上述需求研制的。

该武器属于既可步兵携行地面使用, 又可车载使用的班组支援武器, 兼具大口径机枪和自动榴弹发射器的战术使用特征, 是一种多功能的未来概念武器。笔者基于虚拟样机技术和多刚体动力学理论对武器进行建模与仿真分析^[5-6]。

1 发射系统整体仿真模型的建立

1.1 建立仿真模型的条件假设

在整个发射系统的运动过程中, 各构件的运动、受力情况是十分复杂的, 属于多自由度系统运动; 因此, 把所有运动和碰撞、接触情况都考虑进去既不现实又无必要。根据建模目的和所要研究的内容简化模型, 忽略一些次要影响因素, 合理确定主要影响系统运动的因素, 是非常必要的。笔者对发射系统作了如下假设^[7]:

- 1) 将该发射系统每个零件均视为刚体;
- 2) 不考虑射击时弹丸和枪管间的相互作用力, 只考虑内弹道和后效期过程中的膛压作用, 同时考虑自动机和缓冲装置在运动过程中, 各相关部件间的碰撞力;
- 3) 模型建立过程中将计算得到的膛压直接以外力的形式给出;

收稿日期: 2016-03-26; 修回日期: 2016-05-07

作者简介: 史亦超(1990—), 女, 山西人, 在读硕士, 从事武器新概念、新结构与新原理研究。

4) 模型中发射系统各构件初始位置定为实际自动机在后方挂机位置;

5) 机匣、齿轮箱体和供弹箱体等与运动无关的部件与地面固定, 将固定连接的运动构件通过布尔运算合并成一个构件, 以简化计算模型。

1.2 发射系统仿真模型运动副定义

在已有的三维模型中给零部件赋予各自的材料属性, 修改外观颜色, 以方便区分, 将模型以 Parasolid 格式导出, 随后导入 ADAMS 中。在 ADAMS 中设置重力加速度、系统单位等。模型主要模拟仿真自动机复进、后坐过程中, 供弹机构、齿轮传动机构、离合器、枪管缓冲装置等机构的工作情况。在 ADAMS 中施加各个零部件间的约束如表 1~表 5 所示。

表 1 自动机组件约束

类型	Part1	Part2	类型	Part1	Part2
固定副	机匣	地面	旋转副	曲拐	机匣
平移副	枪机框	机匣	旋转副	曲拐滚子	曲拐
接触副	枪机框	机匣	接触副	曲拐滚子	枪击框
固定副	机匣	止加	固定副	曲拐	曲拐
圆柱副	机头	速块	接触副	锥齿轮	机匣
固定副	击针	抛壳挺	接触副	抛壳挺	抛壳挺
固定副	麻花销	枪机框	接触副	抛壳挺	阻铁
接触副	机头	机头	旋转副	机头阻铁	机匣
移动副	机头	阻铁	移动副	机头推杆	枪机框
固定副	机头	抛壳挺	弹簧	机头推杆	枪机框
固定副	机头	抛壳挺	接触副	机头推杆	枪机框
旋转副	加速	枪机框	弹簧	拉壳钩	机头
接触副	加速	枪机框	接触副	枪机框	枪尾
接触副	加速	机匣	固定副	枪尾	机匣
接触副	加速	止加	弹簧	枪机框	缓冲簧
接触副	加速	速块	接触副	缓冲簧	导杆
接触副	加速	机头	接触副	导杆	枪尾
旋转副	拉壳钩	机头	弹簧	枪机框	发射
					机体

表 2 齿轮箱的约束

类型	Part1	Part2	类型	Part1	Part2
固定副	齿轮箱体	地面	旋转副	连接轴	地面
固定副	输入锥齿轮	输入轴	旋转副	细实输出轴	地面
固定副	齿轮 1	输入轴	旋转副	空心输出轴	地面
固定副	齿轮 2	输入轴	接触副	曲拐锥齿轮	输入锥齿轮
固定副	齿轮 3	连接轴	接触副	齿轮 1	空心输出轴
固定轴	齿轮 4	细实输出轴	接触副	齿轮 2	齿轮 3
旋转副	输入轴	地面	接触副	齿轮 3	齿轮 4

表 3 供弹箱的约束

类型	Part1	Part2	类型	Part1	Part2
固定副	供弹箱体	地面	扭簧	棘爪 1	离合器外壳
固定副	拨弹轮 1	供弹轴	扭簧	棘爪 2	离合器外壳
固定副	拨弹轮 2	供弹轴	接触副	棘爪 1	离合器外壳
固定副	离合器棘轮	供弹轴	接触副	棘爪 2	离合器外壳
固定副	防倒转棘轮	供弹轴	固定副	防倒基座	供弹箱体
固定副	离合器外壳	后盖	平移副	防倒棘齿	防倒基座
固定副	离合器后盖	销轴 1	接触副	防倒棘齿	防倒螺母
固定副	离合器后盖	销轴 2	弹簧	防倒螺母	防倒基座
旋转副	销轴 1	棘爪 1	旋转副	离合器外壳	地面
旋转副	销轴 2	棘爪 2	固定副	弹链 1	弹壳 1
固定副	弹链 2	弹壳 2	固定副	弹链 3	弹壳 3
固定副	弹头 1	弹壳 1	固定副	弹头 2	弹壳 2
固定副	弹头 3	弹壳 3	接触副	拨弹轮	弹壳 1
接触副	拨弹轮	弹壳 2	接触副	拨弹轮	弹壳 3
接触副	拖弹板	弹壳 1	接触副	拖弹板	弹壳 2
接触副	拖弹板	弹壳 3	接触副	脱链齿	弹链 1
接触副	脱链齿	弹链 2	接触副	脱链齿	弹链 3

表 4 枪管缓冲机构的约束

类型	Part1	Part2	类型	Part1	Part2
固定副	缓冲节套	枪管	接触副	缓冲垫圈 2	缓冲套筒
固定副	缓冲节套	缓冲簧导杆	移动副	缓冲导杆	缓冲套筒
固定副	缓冲套筒	机匣	弹簧	缓冲垫圈 1	缓冲垫圈 2
接触副	缓冲垫圈 1	缓冲簧导杆			

表 5 机构间的连接约束

类型	机构 1	机构 2
接触副	自动机组件—曲拐锥齿轮	齿轮传动组件—输入锥齿轮
接触副	齿轮传动组件—大输出轴	供弹机构—离合器外壳
接触副	自动机组件—机头	枪管节套

另外, 还需在枪弹和自动机主动件之间添加接触副, 包括: 弹头—枪管节套、弹壳—机头、弹壳—拉壳钩、弹壳—抛壳挺等。

在设置接触的过程中, 需要对接触力的多种参数进行设置, 包括接触类型、刚度、力指数、阻尼、穿透深度等。其中, 接触类型均选择“实体对实体”, 接触力的计算方法均选择冲击函数法 (Impact)。为减小计算量, 除枪机框与机匣, 枪管缓冲器杆和枪管缓冲器筒之间的接触力外均选择无摩擦; 而枪管缓冲器杆和缓冲器筒之间的摩擦力按“边界润滑中矿物油湿润金属表面”的条件定义^[8]。

1.3 施加载荷

将计算得到穿甲弹/榴弹膛内气体压力随时间变化的数据，结合弹底窝面积转化作用在枪机上的外载荷力随时间变化数据，将数据保存为文本文档，分别命名为 CHUANJIA.TXT、LIUDAN.TXT，文件中数据分 2 列，第 1 列为时间，第 2 列为载荷力^[9]。

用 Adams/View 打开之前建立的仿真模型，将载荷力以试验数据(*.*)形式导入，独立的列引所设置为 1，利用 AKISPL 函数拟合生成相应的样条曲线，如图 1、图 2 所示。

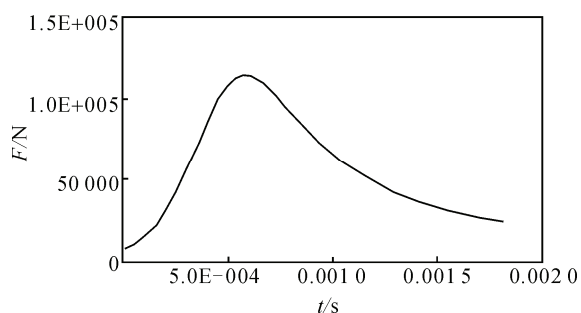


图 1 穿甲弹膛底压力曲线

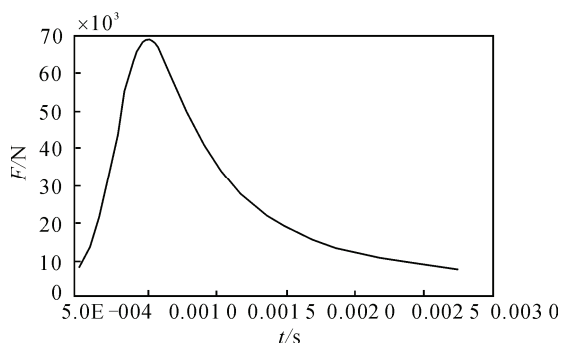


图 2 榴弹膛底压力曲线

按模型所处的空间坐标系，在机头与弹底结合面沿机头轴线水平向后的方向添加作用力，力的运行方向为“随物体运动”，力的大小为：
 $IF(\text{time-senval}(\text{SENSOR}_1):0,0,\text{akispl}(\text{time-senval}(\text{SENSOR}_1),0,\text{SPLINE}_1,0))$ 。

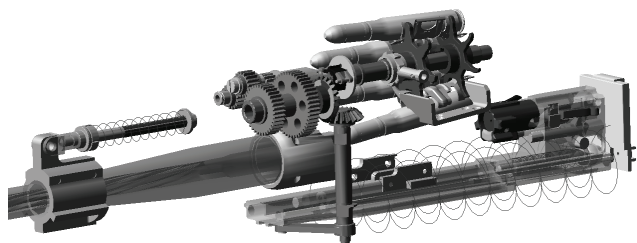


图 3 发射系统的仿真模型

其中，SENSOR_1 为控制膛压作用开始时间建立的传感器，传感器事件定义为自动机推枪管向前；前冲击发位置的位移参数，返回值为 time；SPLINE_1

为导入膛压数据拟合的膛底压力样条曲线。

完全建立的仿真模型如图 3 所示，其中隐藏了某些固定部件，以便于观察。

1.4 发射系统仿真单发计算实例

首先要对建好的发射系统仿真模型进行验证，检验仿真结果的可信度。因为枪机框是驱动整个发射系统运动的核心构件；因此，选取枪机框的运动参数作为发射系统虚拟样机模型的验证指标。以穿甲弹单发射击仿真运算为例，可获得枪机框的速度和位移曲线如图 4 所示。

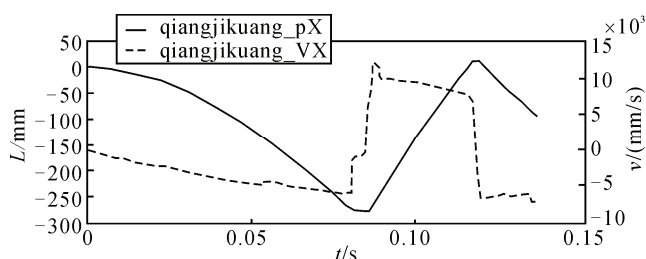


图 4 穿甲弹单发射击仿真枪机框速度和位移曲线

初始时刻枪管静止不动，枪机框在复进簧的作用下加速向前运动，复进到位后，机框速度为 5.6 m/s，机头进入节套；枪机框碰撞身管，两者以共同的速度向前运动，前冲过程中枪弹被击发，很快两者以相同的速度后坐，在加速机构加速结束后，枪机框达到最大速度 12.37 m/s，枪机框开始后坐，在抽壳、供弹、抛壳等阻力与复进簧的作用下，速度逐渐降低，后坐了 282.4 mm 受到自动机缓冲簧的缓冲，直至撞到枪尾部件速度降低为 0。

从枪机框的位移-时间曲线可以看出：枪机框从 0 的初始位置开始复进，在击发后后坐的距离为 291.4 mm，已经与枪尾发生碰撞，自动机后坐到位，后坐到位的速度为 3.9 m/s。

枪机框相对速度和相对位移特征点数据参数如表 6 所示。

表 6 枪机框相对速度、位移数据

行程名称	行程结束时间/ms	速度/(m/s)	位移/mm
推弹前空行程	22.9	-2.20	246.9
推弹行程	77.4	-5.90	18.35
闭锁行程	80.3	-5.55	2.56
复进到位	84.0	-1.03	-4
共同后坐	86	9.79	4.5
加速行程	86.6	11.9	11.77
开锁行程	88.2	11.2	29.5
抛壳位置	116.4	7.34	274
后坐到缓冲前	117	7.26	278.2
缓冲行程	118.7	0.075	286.9
后坐最大位移	118.7	0	287

计算结果与设计目标相比是合理的，证明仿真模型建立正确。

2 自动机运动特性分析

枪机框在复进一后坐过程中，带动曲拐（协调联动机构）运动，进而带动齿轮传动机构驱动供弹系统工作。分别对发射穿甲弹和榴弹连发状态进行仿真，可得到枪机框速度曲线和位移曲线如图 5、图 6。

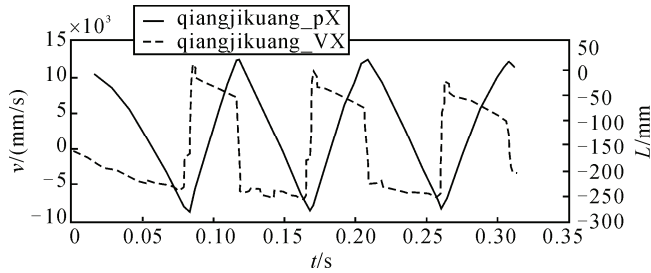


图 5 穿甲弹连发仿真枪机框的速度、位移曲线

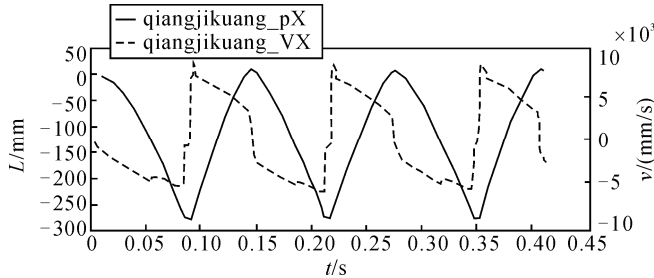


图 6 榴弹连发仿真枪机框的速度、位移曲线

由仿真曲线可得：穿甲弹射击循环时间平均为 103.7 ms，后坐最大速度 12.1 m/s，后坐最大距离 287.2 mm；榴弹射击循环时间平均 137.8 ms，后坐最大速度 8.4 m/s，后坐最大距离 281.5 mm。仿真结果显示：该发射系统的自动机能完成动能弹和榴弹 2 种弹药的发射，自动机的自适应性得到验证。

笔者以发射穿甲弹为例分析协调联动机构、传动机构和供弹机构的运动特性。

枪机框复进一后坐过程中，底面凸轮曲线槽带动曲拐上的滚子运动，可将枪机框的往返平动转变成曲拐的转动，从而带动与曲拐锥齿轮配合的传动锥齿轮运动，进而带动整个传动机构，再由离合器驱动供弹机构运动。曲拐锥齿轮的转动角位移和角速度如图 7 所示，每个复进一后坐循环过程，曲拐转动约 30°，且枪机框复进过程中曲拐角速度最大约为 2 (°)/ms，后坐过程中最大曲拐角速度约为 2.4 (°)/ms。曲拐与枪机框的运动关系如图 8 所示，自动机复进过程中，曲线槽首先带动曲拐滚子转动，作用时间 23.3 ms，自动机位移 129.65 mm；自动机后坐过程中，后坐距离达 144.7 mm 时，曲线槽开

始带动曲拐滚子转动，作用时间 17.5 ms，自动机后坐 140.93 mm。

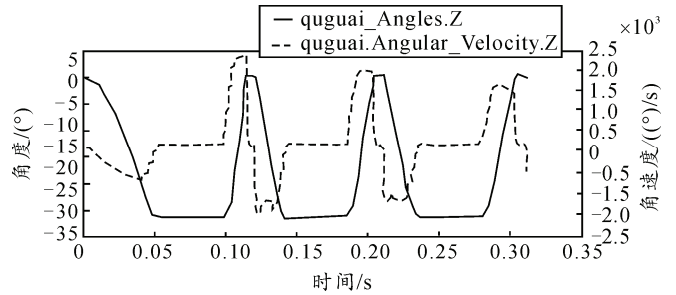


图 7 曲拐的角位移、角速度曲线

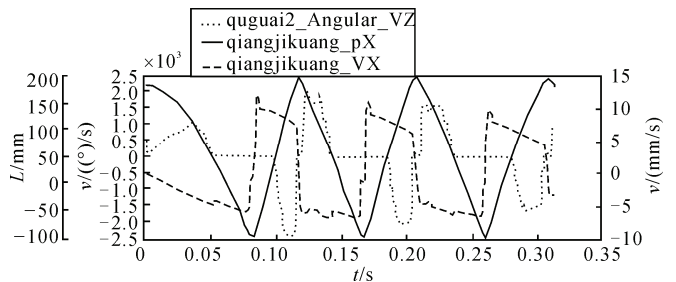


图 8 枪机框与曲拐的运动关系

理论上，曲拐在机框后坐过程中曲线槽的带动下，回转(180/7)(°)，经齿轮传动箱转向放大后，变为(360/7)(°)，后经矩形接头带动离合器，驱动拨弹轮，拨弹轮需要回转(360/7)(°)。复进过程曲拐转动方向与后坐时相反，由于单向离合器和防倒转机构的作用阻止了拨弹轮反向转动。

齿轮传动机构和拨弹轮各传动轴角位移、角速度如图 9 和图 10 所示。

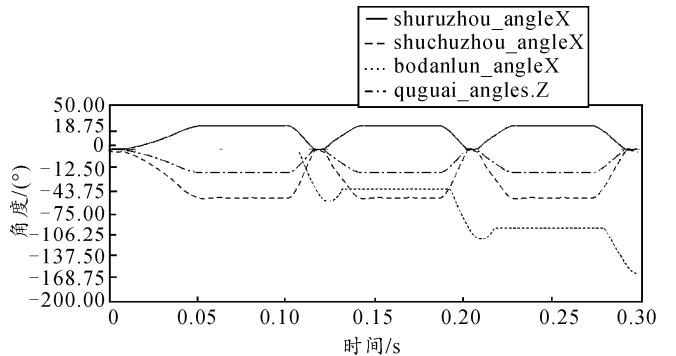


图 9 各轴角位移

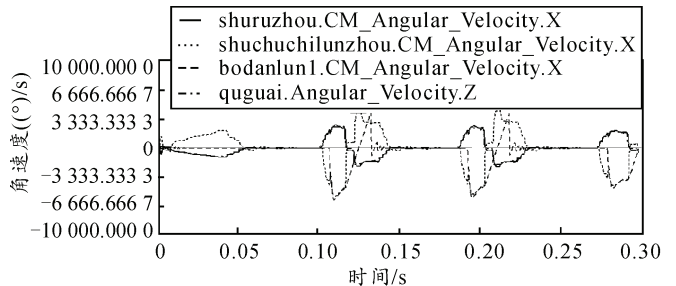


图 10 各轴角速度

由仿真计算得出：自动机在复进一后坐过程中驱动曲拐滚子转动，单向转动角度约 30.6° ，复进过程中最大转速约 $2^\circ/\text{s}$ ，后坐过程中转速最大约 $2.6^\circ/\text{s}$ ，与其配合的齿轮传动机构输入轴的运动规律相一致；经过两级齿轮传动，输出轴角位移是输入轴的 2 倍，约 63.7° ，复进过程中转速最大为 $4.3^\circ/\text{s}$ ，后坐过程中最大转速为 $5.5^\circ/\text{s}$ ；拨弹轮只在自动机后坐过程中转动，每次转动角位移最大值约 68.2° ，由离合器及防倒转机构的配合作用，使得每次拨弹轮的最终角位移固定在 51.4° ，最大角速度约为 $5.9^\circ/\text{s}$ 。

右路供弹时，曲拐锥齿轮的转动由齿轮箱三级齿轮传动最终输出，使得输出角位移相等，方向相反，最终拨弹轮反向拨弹。

3 枪管缓冲特性分析

本自动发射系统采用管退式的自动方式，枪管缓冲装置具有双向缓冲的作用，发射系统具有一定的前冲击发功能，从原理上降低了武器后坐力^[10]。

3.1 双向缓冲装置结构

本双向缓冲装置结构如图 11 所示，主要包括枪管、枪管节套、机头、机框、击发机构、自动机复进簧、枪管缓冲簧等。

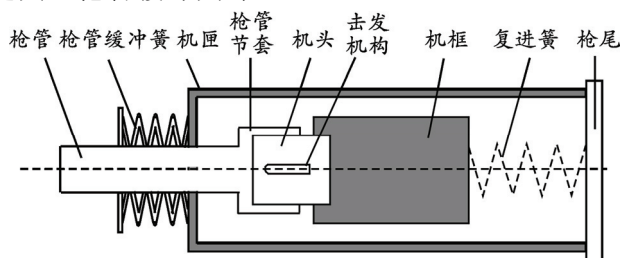


图 11 枪管双向缓冲结构原理

3.2 枪管运动特性分析

有前冲击发的连发状态时，枪管速度、位移曲线如图 12 所示。

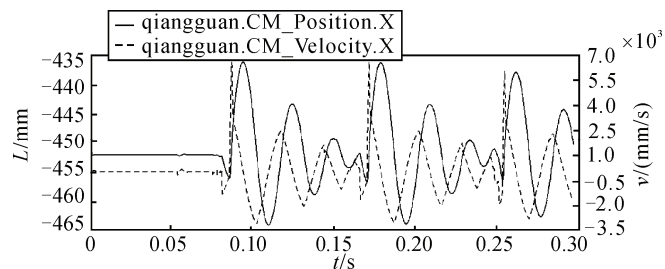


图 12 枪管速度、位移曲线

自动机复进到位后，撞击枪管，在向前运动中完成击发，枪管向前运动最大位移 16.2 mm ，浮动

范围 28.3 mm ，前冲最大速度 6.7 m/s ，击发后枪管与自动机克服前冲冲量后开始后坐；枪管与自动机共同后，随后在加速机构作用下加速开锁，完成后坐抛壳、后坐到位。枪管速度与枪机框速度、位移运动关系如图 13 所示。

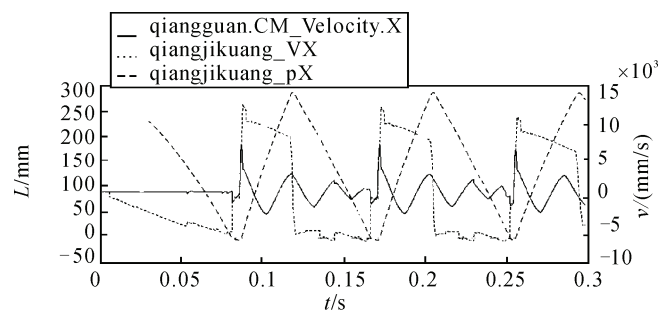


图 13 枪管速度与自动机速度、位移运动关系

3.3 无前冲击发自动机运动特性分析

将缓冲装置摩擦垫圈的一端固定，模拟仿真无前冲击发状态下自动机的运动情况，可得到自动机运动参数及枪管运动参数如图 14~图 18 所示。

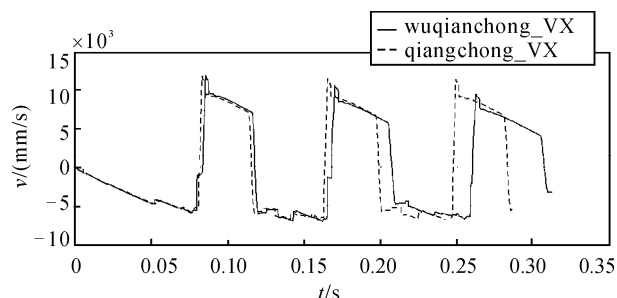


图 14 有无前冲击发状态自动机速度对比

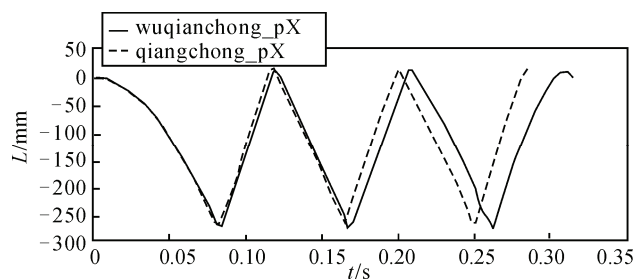


图 15 有无前冲击发状态自动机位移对比

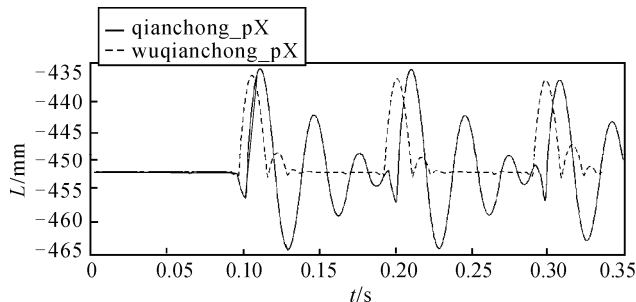


图 16 有无前冲击发状态枪管位移对比

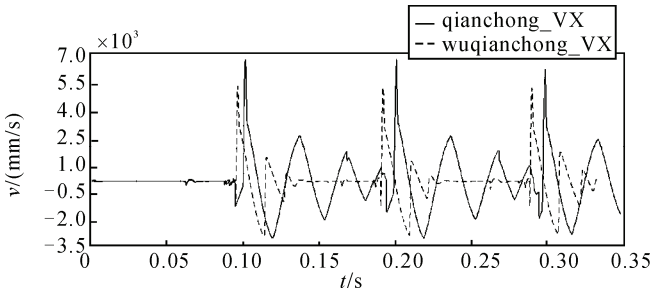


图 17 有无前冲击发状态枪管位移对比

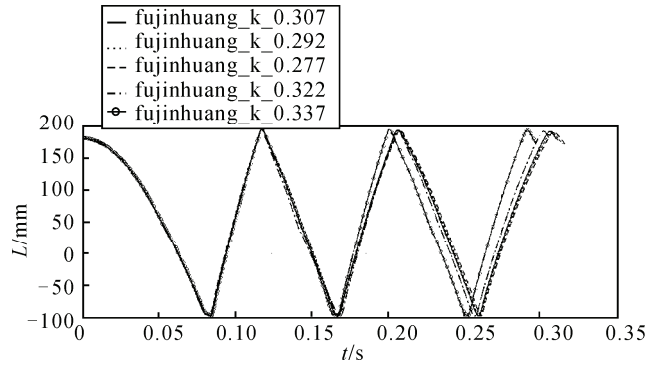


图 19 复进簧刚度变化对自动机位移的影响

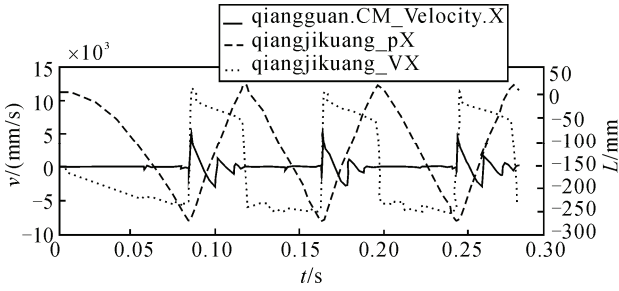


图 18 无前冲击发状态下枪管速度与自动机速度、位移运动关系

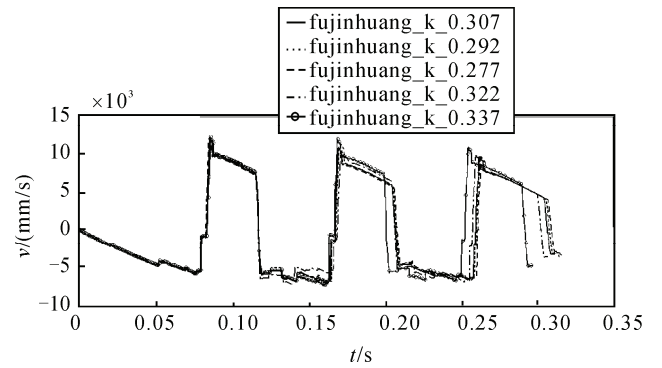


图 20 复进簧刚度变化对自动机速度的影响

由仿真曲线可以看出：无前冲击发状态下，自动机后坐最大速度平均增大 0.9 m/s，后坐最大位移减小 0.33 mm，枪管位移范围 15.2 mm，枪管后坐最大速度减小 1.5 m/s。以上数据显示，前冲击发，枪管缓冲器能够减小自动机和枪管后坐速度，从而减小自动机后坐到位对枪尾的撞击。

4 参数变化对自动机运动特性的影响

该新型自动发射系统的口径较大，结构复杂，射击时各运动构件都是高速、间歇性和往复地工作，常伴有冲击，影响发射系统的运动特性，从而影响射击精度；因此，找出影响自动机运动特性的因素并分析其影响因子的大小，对于发射系统进一步的研究和优化改进是很有必要的。笔者主要针对自动机的运动特性，分别分析自动机复进簧的刚度、预压力，枪管缓冲簧的刚度、预压力，枪管质量，自动机质量的参数变化对自动机运动特性的影响规律。在现有连发模型的基础上，保持其他参数值不变，每次选一种参数作为分析对象，在实际值的基础上以 5% 的范围递增或递减，得到自动机速度和位移曲线，结合仿真动画，得出结论。

4.1 复进簧刚度、预压力对自动机运动特性的影响

图 19 ~ 图 22 分别为复进簧刚度 (fujinhuang_k)、预压力 (fujinhuang_F) 参数值变化后得到的自动机速度、位移曲线。

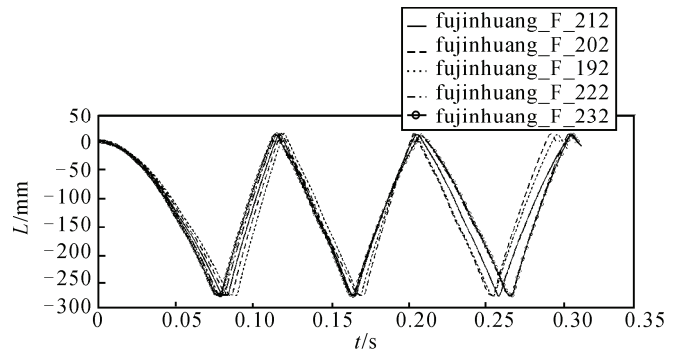


图 21 复进簧预压力变化对自动机位移的影响

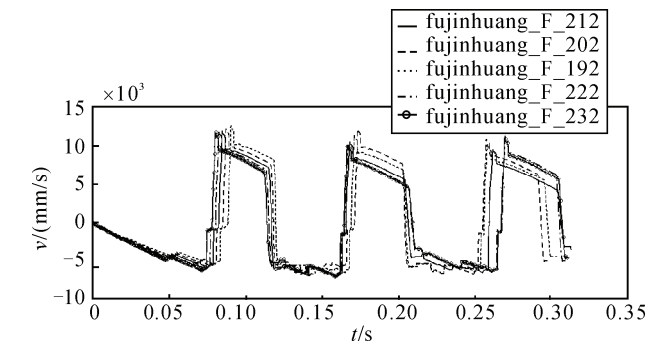


图 22 复进簧预压力变化对自动机速度的影响

由仿真曲线可知：复进簧刚度和预压力变化对自动机后坐速度和射击循环时间(即射频)影响较为明显，对后坐到位的位移影响不大。复进簧刚度变化与自动机后坐速度和武器射频成正比，刚度增大

10%，后坐最大速度提高 0.16 m/s，3 连发射击时间减小 15.3 ms，后坐最大位移提高 2.76 mm；刚度减小 10%，后坐最大速度减小 0.06 m/s，3 连发射击时间增加 2.9 ms，后坐最大位移减少 0.4 mm。复进簧预压力增大 10%，后坐最大速度增加 0.68 m/s，3 连发射击时间减小 8.4 ms，后坐最大位移减少 0.66 mm；预压力减小 10%，后坐最大速度增加 0.66 m/s，3 连发射击时间减少 13.9 ms，后坐最大位移增加 3.22 mm。

4.2 缓冲簧参数对自动机运动特性的影响

图 23 ~ 图 26 为枪管缓冲簧刚度 (huanchonghuang_k)、预压力 (huanchonghuang_F) 的参数值变化后得到的自动机速度、位移曲线。

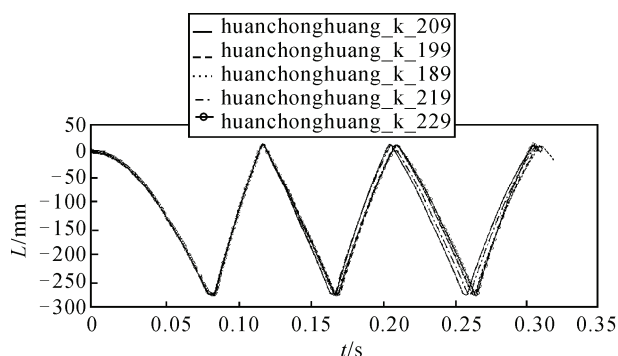


图 23 枪管缓冲簧刚度变化对自动机位移的影响

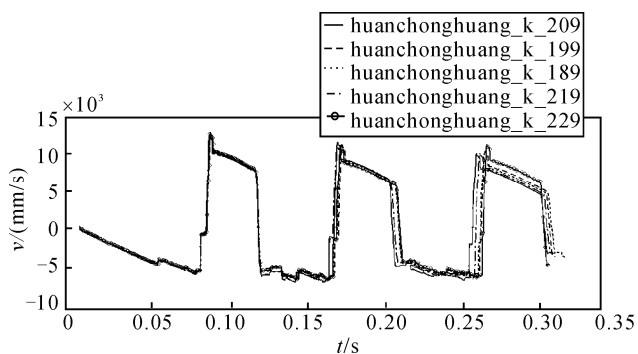


图 24 枪管缓冲簧刚度变化对自动机速度的影响

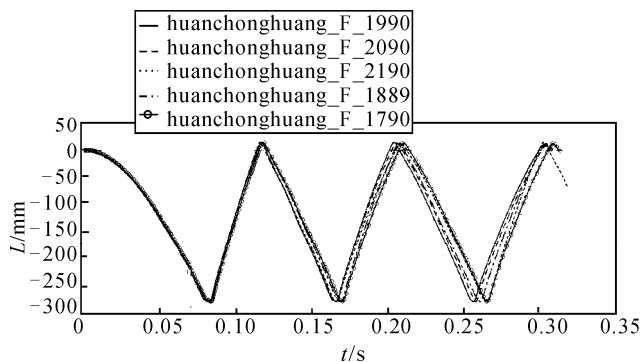


图 25 枪管缓冲簧预压力变化对自动机位移的影响

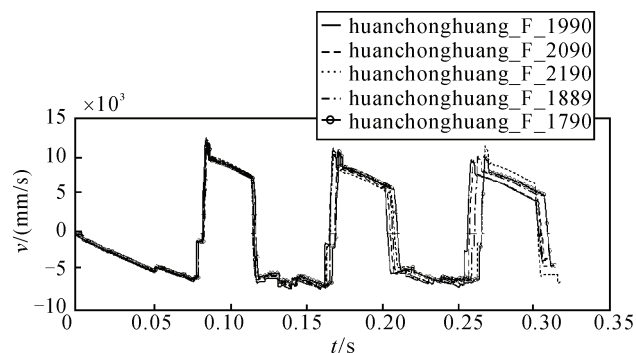


图 26 枪管缓冲簧预压力变化对自动机速度的影响

由仿真结果得出：枪管缓冲簧的刚度和预压力变化对自动机后坐速度及后坐位移的影响较为明显，对射击循环时间(即射频)影响不大。缓冲簧刚度增大 10%，后坐最大速度提高 0.19 m/s，3 连发射击时间减少 0.9 ms，后坐最大位移减少 0.32 mm；刚度减小 10%，后坐最大速度减小 0.03 m/s，3 连发射击时间增加 4.8 ms，后坐最大位移减少 0.42 mm。缓冲簧预压力增大 10%，后坐最大速度减少 0.16 m/s，3 连发射击时间增加 5.5 ms，后坐最大位移减少 0.43 mm；预压力减小 10%，后坐最大速度增加 0.44 m/s，3 连发射击时间减少 1.3 ms，后坐最大位移减少 0.26 mm。

4.3 枪管质量变化对自动机运动特性的影响

图 27~图 28 为枪管质量 (qiangguan_m) 的变化后得到的自动机速度、位移曲线。

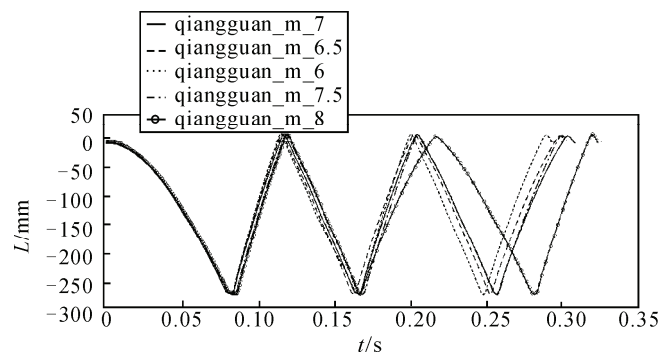


图 27 枪管质量变化对自动机位移的影响

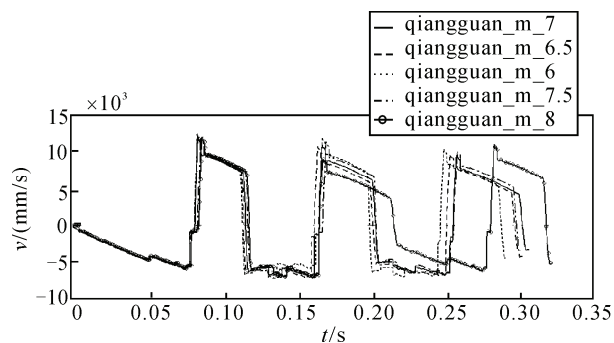


图 28 枪管质量变化对自动机速度的影响

由仿真曲线可以看出：枪管质量的变化对自动机运动影响比较明显，尤其是枪管质量增大对武器射频的影响较大。枪管质量增大 10%，自动机后坐最大速度减小了 0.01 m/s，后坐最大位移减小了 0.24 mm，而 3 连发射击时间增大了 15.4 ms；枪管质量减小 10%，自动机后坐最大速度增大了 0.53 m/s，后坐最大位移增大了 0.25 mm，而 3 连发射击时间减少了 14.5 ms。

4.4 自动机质量变化对其运动特性的影响

图 29~图 30 是自动机质量(主要是机框质量 qiangjikuang_m)变化对其运动特性的影响。

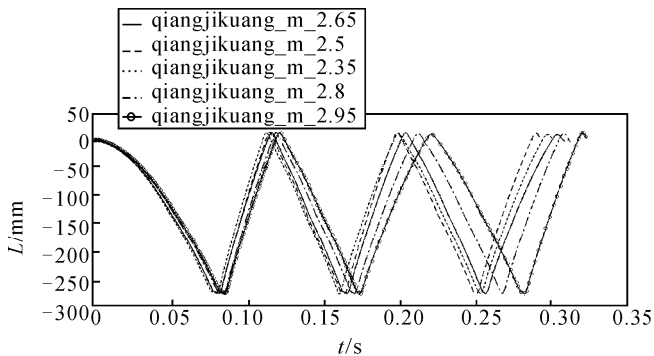


图 29 自动机质量变化对其位移的影响

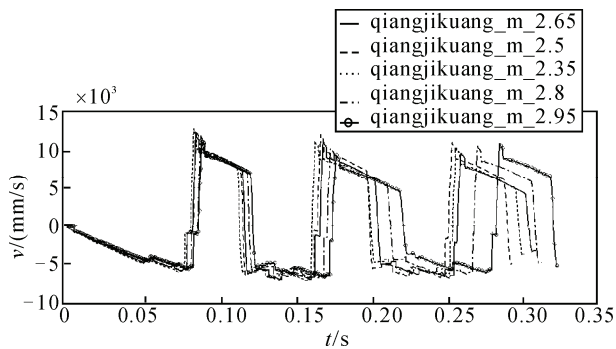


图 30 自动机质量变化对其速度的影响

由上图可以看出，自动机质量变化对其运动影响也比较明显。枪机框质量增大 10%，自动机后坐最大速度减小了 0.71 m/s，后坐最大位移减小了 0.39 mm，而 3 连发射击时间增大了 34 ms；枪管质量减小 10%，自动机后坐最大速度增大了 0.78 m/s，

后坐最大位移减小了 0.4 mm，而 3 连发射击时间减少了 14.5 ms。

5 结束语

笔者在分析某新型自动发射系统的自动循环动作的基础上，建立该系统的虚拟样机模型，分别针对不同工况进行动力学仿真，得到自动机的运动规律。分析了自动机复进簧的刚度、预压力，枪管缓冲簧的刚度、预压力，枪管质量，自动机质量等对自动机运动特性的影响，得到了参数变化对自动机运动的影响规律。由仿真结果可以看出：武器设计参数对自动机运动规律的影响并不成特定规律，设计者必须综合分析各参数变化对其运动特性的影响，寻求最佳参数匹配方案，该研究能够为武器设计提供一定的参考依据。

参考文献：

- [1] 宋其文, 曾广隆, 项真林. 我国班组支援武器发展展望[J]. 现代兵器, 2001(6): 33-34.
- [2] 徐诚, 吴小清, 吴志林. 理想班组支援武器系统(OCSW)技术剖析[J]. 轻兵器, 2000(2): 17-18.
- [3] 王红玲. 美国理想班组支援武器系统(OCSW)及其发展[J]. 轻兵器, 2001(1): 12-13.
- [4] 刘晓海. 世界步兵班武器配置发展趋势分析[J]. 轻兵器, 2009(10): 10-12.
- [5] 徐诚, 王亚平. 火炮与自动武器动力学(国防科工委十五规划)[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006: 145-195.
- [6] 李增刚. ADAMS 入门详解与实例[M]. 北京: 国防工业, 2014: 15-118.
- [7] 贺大为, 李忠新. 弹簧缓冲器对某机枪射频和后坐力的影响分析[J]. 兵工自动化, 2015, 34(1): 44-48.
- [8] 侯杭州. 小型简易双路供弹系统的建模与仿真[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [9] 赵彦峻, 骆宇飞, 齐玉辉, 等. 单兵自动武器建模与仿真研究[J]. 南京理工大学学报, 2009, 33(6): 774-778.
- [10] 赵艳, 廖振强. 基于 ADAMS 的某机枪浮动装置动力学仿真研究[J]. 兵工自动化, 2014, 33(4): 84-87.