

doi: 10.7690/bgzd.2022.01.003

迟发火对某内能源自动机动态特性的影响分析

梅康¹, 罗定^{1,2}, 王茂森¹, 林圣业¹, 何福¹, 戴劲松¹

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094; 2. 国营第497厂, 重庆 400071)

摘要: 为提高自动机射击的可靠性, 分析迟发火对某内能源自动机动态特性的影响。通过分析该自动机闭锁时的结构原理, 建立该自动机闭锁击发时的虚拟样机模型。对首发、起始浮动和稳定浮动时闩座自由反跳情况进行动力学仿真, 并与实验结果进行对比, 验证所建虚拟样机的可信性。在此基础上构建闩座相对于炮箱位移的判据, 仿真得到首发、起始浮动和稳定浮动时迟发火会对自动机造成的影响。结果表明: 造成自动机故障的时间范围首发时为10~30 ms, 起始浮动时为6~34 ms, 稳定浮动时为9~32 ms; 该分析可为后续同样结构的内能源自动机设计提供参考。

关键词: 内能源自动机; 迟发火; 故障; 虚拟样机

中图分类号: TJ392 **文献标志码:** A

Influence Analysis of Delayed Ignition on Dynamic Characteristics of Internal Energy Automatic Gun

Mei Kang¹, Luo Ding^{1,2}, Wang Maosen¹, Lin Shengye¹, He Fu¹, Dai Jinsong¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;
2. State-Owned No. 497 Factory, Chongqing 400071, China)

Abstract: In order to improve the firing reliability of the automatic gun, the influence of delayed ignition on the dynamic characteristics of internal energy automatic gun was analyzed. By analyzing the structural principle of the automatic gun when it is automatically locked, the virtual prototype model of the automatic gun when it is locked and firing is established. The dynamic simulation of the free rebound of the latch seat during the first launch, initial floating and stable floating is carried out, and the experimental results are compared to verify the credibility of the established virtual prototype. On this basis, the criterion of the displacement of the latch seat relative to the gun box is constructed, and the influence of delayed ignition on automatic gun during the first launch, initial floating and stable floating are simulated. The results show that the time range of causing automatic gun failure is 10~30 ms for the first launch, 6~34 ms for the initial floating, and 9~32 ms for the stable floating. This analysis can provide reference for the subsequent design of internal energy automatic gun with the same structure.

Keywords: internal energy automatic gun; delayed ignition; failure; virtual prototype

0 引言

迟发火直接影响自动机动态特性, 甚至造成自动机损伤、膛外炸壳等故障, 一直是火炮发射领域的研究热点。迟发火危害主要发生在外能源自动机上, 内能源自动机受迟发火的影响很小, 但某内能源自动机却在射击过程中发生了迟发火导致自动机损伤的故障(炸膛); 因此, 内能源自动机也会存在迟发火危害问题。目前, 国内外尚未见迟发火导致内能源自动机损伤故障发生机理的研究报道, 有必要针对某内能源自动机开展迟发火影响分析, 明确迟发火对其动态特性的影响规律, 完善该内能源自动机设计的理论体系, 提高自动机射击的可靠性。

现有研究表明: 某自动机发生迟发火导致意外

停射、药筒破裂故障的根本原因是炮弹迟发火, 在抽筒阶段底火发火点燃发射药或抽筒阶段膛内压力较高, 使高射速转管炮在退壳过程中药筒被炸裂^[1]。某内能源自动机采用鱼鳃撑板式闭锁机构, 闭锁时存在闩座反跳现象, 当弹药存在一定发火延迟而闩座反跳距离超过开锁前自由行程时, 将导致炮闩提前开锁, 造成自动机损伤、膛外炸壳等故障^[2]。

目前, 国内外学者开展了大量关于闭锁机构可靠性分析的研究, 采用的方法主要包括故障树分析法和虚拟样机仿真法。故障树分析法通过对自动机迟发火故障的原因进行统计和分类, 能够准确找出起主导作用的因素, 但依赖大量实验结果, 费用高。虚拟样机仿真法则是通过建立自动机虚拟样机

收稿日期: 2021-09-13; 修回日期: 2021-10-28

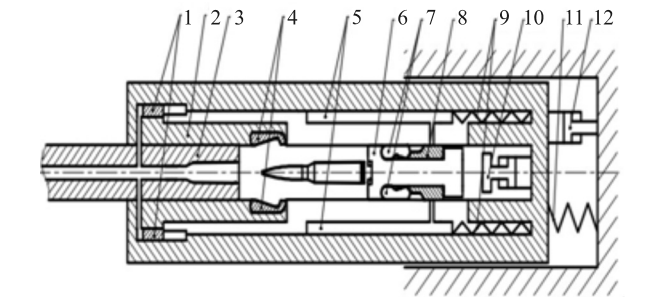
作者简介: 梅康(1995—), 男, 江苏人, 硕士, 从事高射频自动发射技术研究。E-mail: 15261636828@163.com。

模型, 由动力学仿真复现射击动作, 分析结果较准确, 费用低、周期短。邢宏光等^[3]建立炮闩虚拟样机, 进行炮闩运动学和动力学仿真, 通过分析炮闩的运动规律来了解炮闩故障机理, 为分析装备可靠性提供理论依据。朱延飞等^[4]运用故障树加仿真的方法, 对难以确认的故障原因进行了详细的动力学仿真分析, 确定了炮闩机头闭锁面出现微裂纹及磨损的主要因素, 提出了故障解决措施。

针对该内能源自动机闩座在闭锁击发时的反跳问题, 建立了该自动机闭锁击发时的虚拟样机模型, 对首发、起始浮动和稳定浮动时闩座反跳情况进行动力学仿真, 分析这 3 种情况下闩座自由反跳距离, 并建立闩座相对于炮箱位移的判据, 仿真得到这 3 种情况下迟发火对自动机造成的影响。

1 自动机结构及工作原理

某内能源自动机为导气式自动机, 主要由身管、炮箱、炮闩缓冲器、输弹活塞、输弹滑筒、闭锁机构和浮动机等组成。其闭锁机构为鱼鳃撑板刚性闭锁结构, 主要由闩座、闭锁块、支撑块、炮闩等组成^[1], 主要结构如图 1 所示。闭锁机构闭锁击发状态结构如图 2 所示。



1. 输弹活塞; 2. 炮箱; 3. 身管; 4. 支撑块; 5. 输弹滑筒; 6. 炮闩; 7. 闭锁块; 8. 闩座; 9. 输弹簧; 10. 炮闩缓冲器活塞; 11. 浮动机簧; 12. 液压浮动机

图 1 主要结构

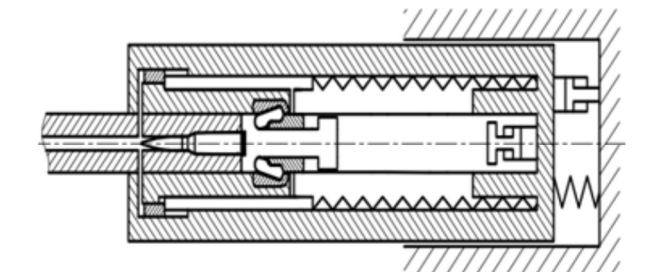


图 2 闭锁机构闭锁击发状态

闭锁击发过程: 输弹簧一端与炮箱相连, 另一端与输弹滑筒相连, 闩座与输弹滑筒固连。炮闩组件在输弹簧力作用下复进, 推动炮弹入膛; 当炮闩关闩到位后, 闩座与炮闩开始产生相对移动, 推动

闭锁块张开如图 3 所示, 使之向外转动进入支撑块, 从而实现刚性闭锁; 闩座将继续复进 20 mm 自由行程, 闭锁到位后击针打击底火如图 2 所示。由于输弹簧带动滑筒、闩座等向前的能量较大, 使得闩座带动滑筒反跳。正常情况下, 击发后膛压迅速上升, 由药筒底部作用于炮闩, 通过闭锁块、支撑块传递到炮箱, 炮箱开始后坐; 同时, 由于炮箱闭锁支撑面对闭锁块不能形成自锁, 故在炮膛合力作用下, 闭锁块向内转动楔紧闩座, 阻止闩座继续反跳, 使闩座始终位于 2 闭锁块之间, 保持刚性闭锁, 直到输弹活塞推动输弹滑筒开锁开闩抽壳。

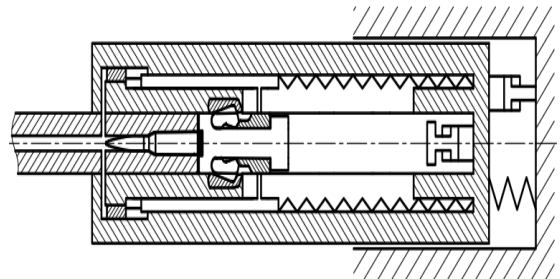


图 3 闭锁开始(或开锁结束)状态

开锁开闩抽壳过程: 当弹丸通过导气孔位置后, 火药气体开始从导气孔流入气室, 导气室内火药气体压力升高, 推动输弹活塞撞击输弹滑筒, 滑筒带动闩座后坐。当闩座运动 20 mm 后, 到达开锁临界状态如图 4 所示, 继续后坐, 闭锁块失去闩座的支撑, 而闭锁块与支撑块的接触面是非自锁面, 在正压力作用下, 左右两闭锁块向内旋转与支撑块脱离, 使炮闩、闩座成开闩状态如图 3 所示, 继续向后运动, 完成抽壳。药筒和炮闩组件一起继续后坐, 当炮闩组件后坐到位时, 闩座撞击炮闩缓冲器, 炮闩缓冲器吸收撞击能量, 同时储存复进力, 炮闩组件后坐能量消失后在缓冲器和输弹簧的作用下复进, 推下一发炮弹入膛, 完成自动循环动作。

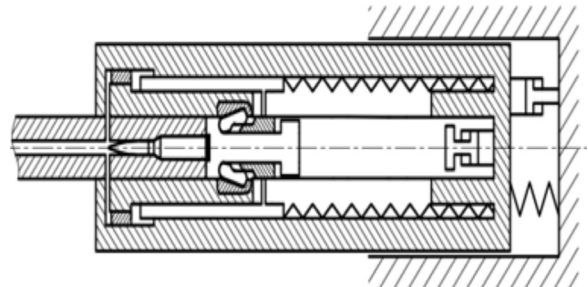


图 4 闩座闭锁临界(或开锁临界)状态

2 虚拟样机模型建立

该自动机采用浮动射击, 全炮后坐位移如图 5 所示。

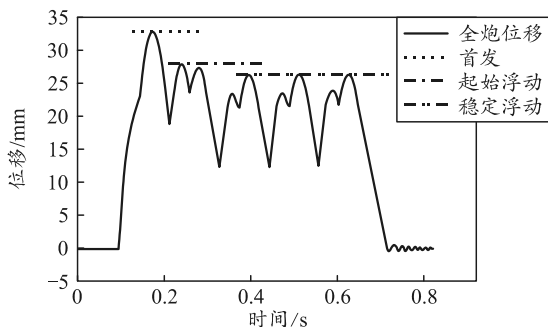


图 5 全炮后坐位移

由上图可知，自动机首发闭锁击发时在初始位置，从第 3 发开始实现稳定浮动。为考虑全面和更严谨，将该自动机闭锁的反跳分为 3 种情况考



图 6 虚拟样机模型

根据实际物理模型赋予各个实体材料属性；根据自动机的工作原理，建立各构件之间的约束关系如表 1 所示。

表 1 各构件约束关系

构件 1	构件 2	约束副
炮箱	浮动机活塞杆	固定副
炮箱	身管	固定副
炮箱	支撑块	固定副
炮箱	地面	移动副
浮动机外筒	地面	固定副
闭锁块	炮闩	移动副
炮闩	炮箱	移动副
闭锁块	炮闩	旋转副
输弹活塞	炮箱	移动副
闭锁块	输弹滑筒	固定副

由于首发、起始浮动和稳定浮动闭锁击发时，炮箱相对于浮动机外筒的位置不同，根据 3 种情况下浮动机外筒相对于炮箱的距离，调整浮动机外筒位置，并根据各构件的位置设置弹簧刚度系数、阻尼系数和预载荷等；根据膛压曲线(图 7)和输弹导气室压力曲线(图 8)所示，分别在炮闩、输弹活塞上施加炮膛合力和开锁力^[7-8]，初始条件设置为炮箱和闭锁块初始速度。

浮动机液压阻力 F 为：

$$F = (K\rho A^3 / 2a_x^2) V^2 \quad (1)$$

式中： K 为液压阻力系数，取 $K=1.5$ ； ρ 为液压油的密度，取 $\rho=850 \text{ kg/m}^3$ ； a_x 为活塞上流液孔面积； A 为活塞工作面积； V 为炮箱后坐速度。

虑：1) 首发；2) 起始浮动(第 2 发)；3) 稳定浮动(以第 4 发闭锁反跳情况来近似代替稳定浮动时的任意一发闭锁反跳情况)。

在建立该自动机闭锁击发时的模型时，作出如下假设：1) 该自动机近似为一个多刚体系统；2) 忽略运动副间隙和系统振动；3) 输弹滑筒与闭锁块固定约束，忽略相互之间的碰撞。

根据该自动机在闭锁时的结构原理，通过 3 维建模软件建立该自动机闭锁击发时的 3 维模型，并做适当简化^[5-6]，即去掉或合并不影响工作效果的零件，经过简化后导入多体动力学软件中，建立该自动机闭锁击发时的虚拟样机模型如图 6 所示。

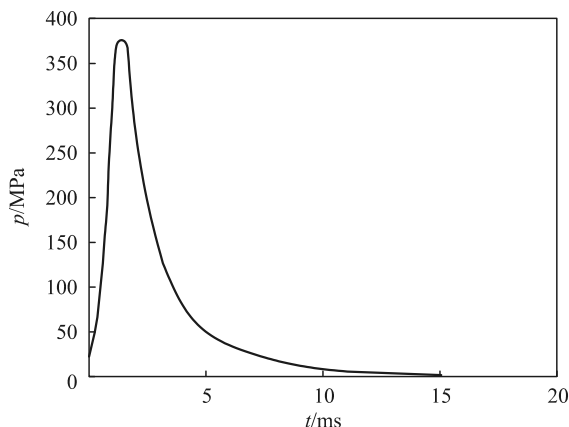


图 7 膛压

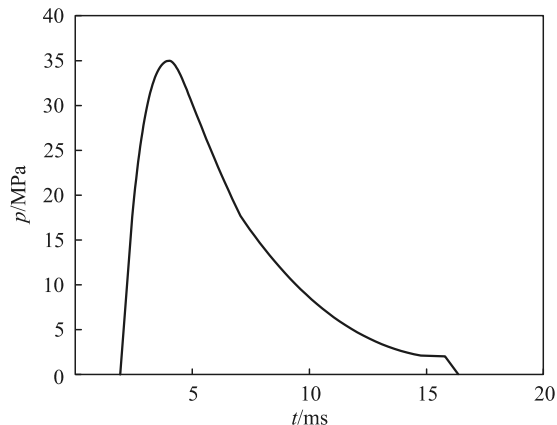


图 8 输弹导气室压力

复进和后坐过程中 a_x 和 A 值是不同的，用 IF 函数来设置复进和后坐时的液压阻力。

在多刚体系统中，接触问题是一个比较复杂的

力学问题，在多体动力学软件中采用非线性等效弹簧—阻尼法来模拟接触过程，该方法在数学上便于处理^[9]。接触力可表示为：

$$F = kg^e + c(dg/dt)。 \quad (2)$$

式中： k 为 Hertz 接触刚度，N/mm； e 为力指数； g 为渗透量，mm； c 为阻尼系数。

在动力学模型求解过程中，为了能够更好地计算接触力，假设接触碰撞过程不是瞬时，而是阻尼系数随接触变形量的增加而增大，接触开始时阻尼系数为 0，当变形量达到最大值 D_{max} 时，阻尼系数取用户输入值 C_{max} ，使用下式来进行修正：

$$c = \begin{cases} 0 & g \leq 0 \\ C_{max} (g/D_{max})^2 (3 - 2(g/D_{max})) & 0 \leq g \leq D_{max} \\ C_{max} & D_{max} \leq g \end{cases}。 \quad (3)$$

切向接触力采用比较简单的库仑摩擦力模型来计算^[10]。

3 实验验证

利用高速摄影技术，可以对自动机闩座运动参数进行非接触式观测，不会对闩座运动特性带来干扰，具有高精度、布置方便、可靠性强的特点^[11]。高速摄影测试系统如图 9 所示，闩座位移测试实景如图 10 所示。

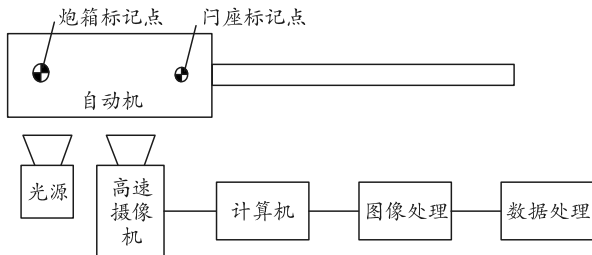


图 9 高速摄影测试系统

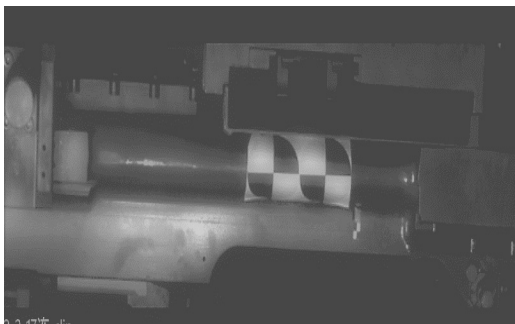


图 10 闩座位移测试实景

通过仿真计算得到了在 3 种情况下不受炮膛合力作用时闩座自由反跳的情况，并分别与实验结果进行了对比。首发、起始浮动和稳定浮动时闩座自由反跳情况与实验结果对比分别如图 11—13 所示。

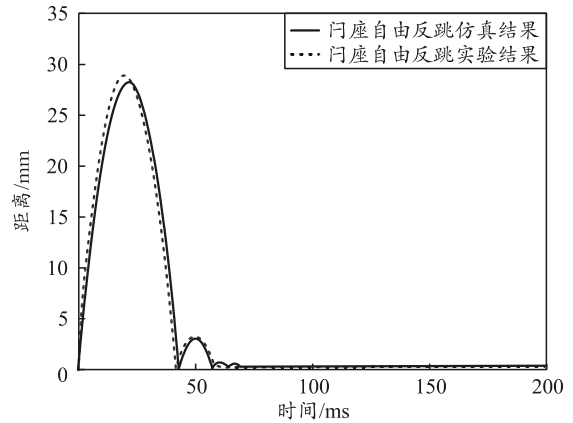


图 11 首发时闩座自由反跳情况

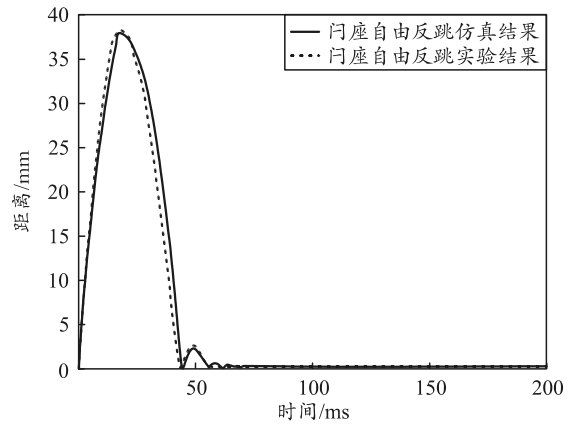


图 12 起始浮动时闩座自由反跳情况

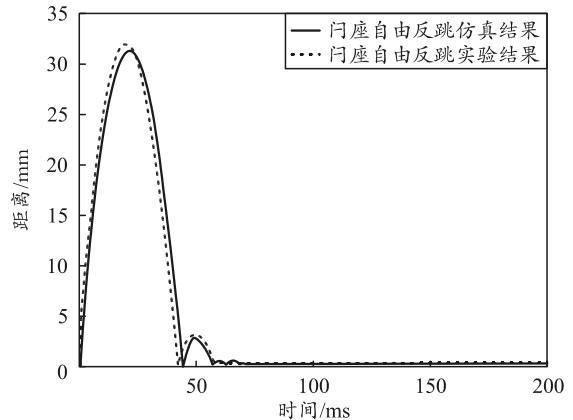


图 13 稳定浮动时闩座自由反跳情况

由上图可知：闩座自由反跳仿真结果与实验结果较为吻合，且误差在允许范围内，证明了所建虚拟样机的可信性。同时，3 种情况下闩座自由反跳最大距离均超过了 20 mm 自由行程，且起始浮动时闩座最大反跳距离 > 稳定浮动 > 首发，其中首发闩座在 20.7 ms 时达到最大反跳距离 28.3 mm，起始浮动时闩座在 17.7 ms 时达到最大反跳距离 38.2 mm，稳定浮动时闩座在 21.4 ms 时达到最大反跳距离 31.3 mm。3 种情况下闩座均在到达最大反跳距离后，在输弹簧力的作用下又再次复进闭锁，产生第

2 次反跳，且第 2 次反跳距离均远远小于 20 mm 自由行程，闭座反跳距离逐渐衰减；因此，3 种情况下闭座反跳时均会 2 次到达 20 mm 自由行程临界点，其中到达 20 mm 自由行程临界点时间为：首发闭座在 9.8 ms 和 32.7 ms 到达、起始浮动时闭座在 6.8 ms 和 36.2 ms 到达、稳定浮动时闭座在 8.6 ms 和 34.5 ms 到达。

4 影响结果与分析

4.1 首发迟发火影响

弹药正常发火延迟为 1~4 ms。以 1 ms 延迟为间隔，将炮膛合力和导气室推力分别施加在炮闩和输弹活塞上，并作相应延迟，仿真计算得到首发弹药在 1~4 ms 延迟发火情况下闭座相对于炮箱位移如图 14 所示。

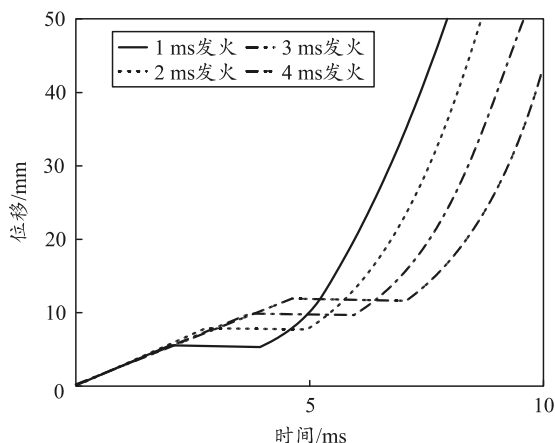


图 14 首发弹药在 1~4 ms 延迟发火情况下闭座相对于炮箱位移

由上图可知：在相应的延迟发火时间之前，闭座存在反跳，但在发火时间到来后，在炮膛合力作用下，闭锁块楔紧闭座，闭座相对于炮箱的位移基本不变，即产生几乎平行于横坐标轴的曲线段，随后输弹活塞推动输弹滑筒，输弹滑筒带动闭座运动，闭座相对于炮箱的位移继续增加；因此，首发弹药在正常 1~4 ms 发火情况下，炮闩闭锁可靠，不会由于迟发火而导致自动机出现损伤故障。

根据首发闭座自由反跳情况，只有第 1 次反跳出现了超过 20 mm 自由行程的情况，其余皆在 20 mm 自由行程内；因此，只有在第 1 次反跳时可能会产生迟发火危害。根据闭座跳出 20 mm 和跳回 20 mm 自由行程的时间，并不能确定迟发火时间在 9.8~32.7 ms 时，就会导致自动机出现损伤故障；因此，需要确定首发迟发火会造成故障的具体时间范围。

根据首发闭座 2 次到达 20 mm 自由行程的时间 9.8 ms 和 32.7 ms，以 1 ms 延迟为间隔，对施加于炮闩上的炮膛合力和输弹活塞上的导气室推力作相应的延迟，通过大量的仿真计算（试错法），并以闭座是否在一定时间内相对于炮箱的位移不变为判断依据，得到了闭座在 9.8 ms 和 32.7 ms 时间的基础上具体会造成自动机损伤故障的时间范围。7~12 ms 延迟情况下闭座相对于炮箱位移如图 15 所示，28~33 ms 延迟情况下闭座相对于炮箱位移如图 16 所示。

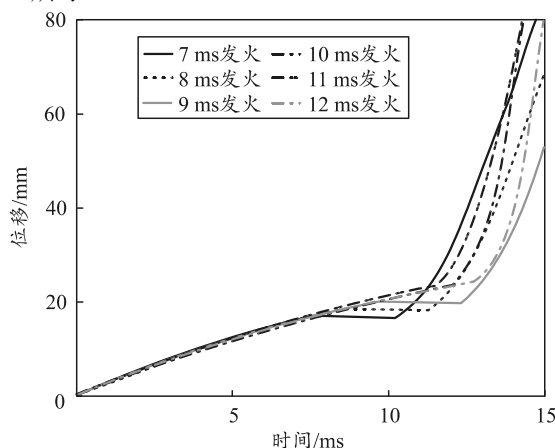


图 15 7~12 ms 延迟情况下闭座相对于炮箱位移

由上图可知：弹药在 9 ms 时间内发火时，闭座虽然会存在反跳，但均会在炮膛合力作用下被闭座楔紧，使闭座相对于炮箱的位移在一定时间范围内几乎不变，闭座位移一时间曲线上产生几乎平行于横坐标轴的曲线段，之后输弹活塞作用，闭座相对于炮箱的位移继续增加；但当弹药发火时间为 10 ms 后，闭座相对于炮箱的位移持续增加，没有在一定时间内闭座相对于炮箱的位移几乎不变，即闭座没有被闭锁块楔紧，炮闩闭锁不可靠。

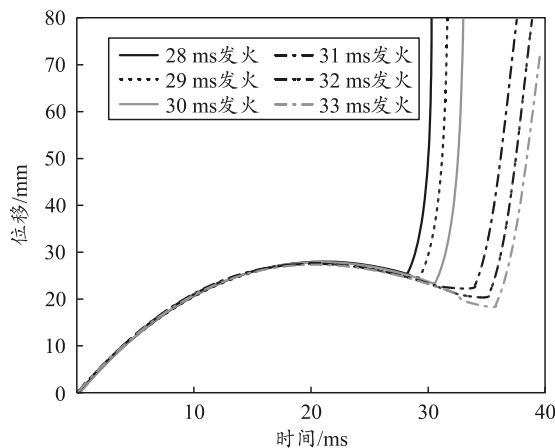


图 16 28~33 ms 延迟情况下闭座相对于炮箱位移

由上图可知：弹药在 30 ms 发火时间之前，闭

座相对于炮箱的位移持续变化，没有在一定时间内闭座相对于炮箱的位移几乎不变，即闭座没有被闭锁块楔紧，炮闭锁不可靠。当弹药发火时间在 31 ms 之后，闭座在一定时间内相对于炮箱的位移几乎不变，即闭座被闭锁块楔紧，此时间之后，炮闭锁可靠，不会由于迟发火而导致自动机出现损伤故障。

综上所述，首发闭座闭锁击发后，弹药在正常 1~4 ms 发火时间范围内炮闭锁可靠，不会由于迟发火而导致自动机出现损伤故障。根据第 1 次反跳超过 20 mm 自由行程的时间，以 1 ms 延迟为间隔，仿真得到了迟发火会造成自动机故障的时间范围为 10~30 ms。

4.2 起始浮动时迟发火影响

与首发迟发火影响分析相同，仿真计算得到起始浮动时弹药在 1~4 ms 延迟发火情况下闭座相对于炮箱位移如图 17 所示。

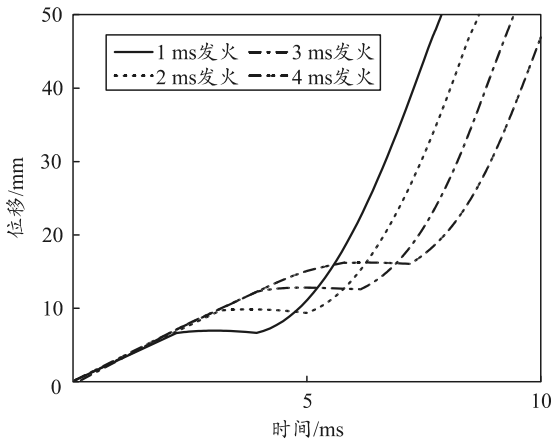


图 17 起始浮动时弹药在 1~4 ms 延迟发火情况下闭座相对于炮箱位移

由上图可知：与首发相同，在相应的延迟发火时间之前，闭座同样存在反跳，但在发火时间到来后，在炮膛合力作用下，闭锁块楔紧闭座，闭座很快相对于炮箱的位移基本不变；因此，起始浮动时弹药在正常 1~4 ms 发火情况下，炮闭锁可靠，不会由于迟发火而导致自动机出现损伤故障。

根据起始浮动时闭座 2 次到达 20 mm 自由行程的时间 6.8 ms 和 36.2 ms，以 1 ms 延迟为间隔，通过仿真计算得到了闭座在 6.8 ms 和 36.2 ms 时间基础上具体会造成自动机损伤故障的时间范围。3~8 ms 延迟情况下闭座相对于炮箱位移如图 18 所示，32~37 ms 延迟情况下闭座相对于炮箱位移如图 19 所示。

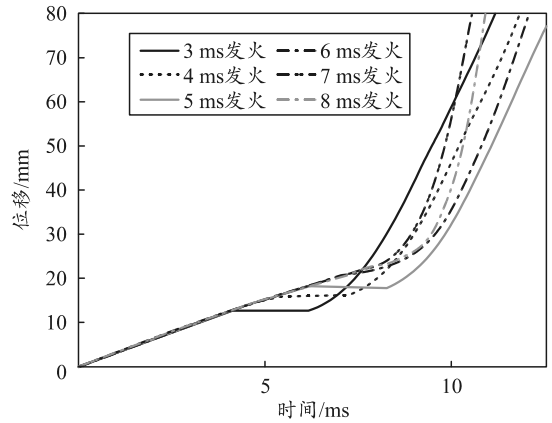


图 18 3~8 ms 延迟情况下闭座相对于炮箱位移

由上图可知：弹药在 5 ms 时间内发火时，闭座虽然会存在反跳，但均会在炮膛合力作用下被闭座楔紧，使闭座相对于炮箱的位移在一定时间范围内几乎不变。但当弹药发火时间为 6 ms 后，闭座相对于炮箱的位移持续增加，闭座没有被闭锁块楔紧，炮闭锁不可靠。

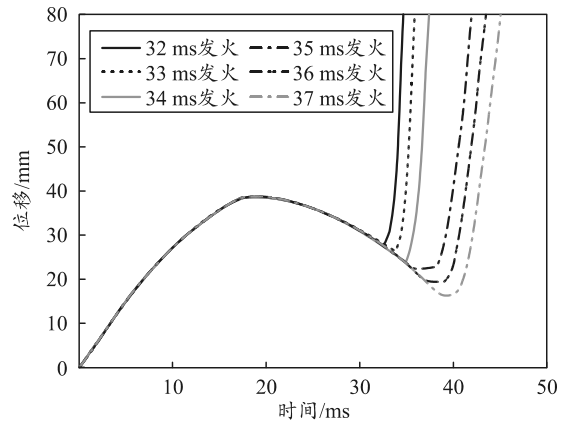


图 19 32~37 ms 延迟情况下闭座相对于炮箱位移

由上图可知：弹药在 34 ms 发火时间之前，闭座相对于炮箱的位移持续变化，闭座没有被闭锁块楔紧，炮闭锁不可靠。当弹药发火时间在 35 ms 之后，闭座在一定时间内相对于炮箱的位移几乎不变，即闭座被闭锁块楔紧；此时间之后，炮闭锁可靠，不会由于迟发火而导致自动机出现损伤故障。

综上所述，起始浮动时闭座闭锁击发后，弹药在正常 1~4 ms 发火时间范围内炮闭锁可靠，不会由于迟发火而导致自动机出现损伤故障。根据第 1 次反跳超过 20 mm 自由行程的时间，以 1 ms 延迟为间隔，仿真得到了迟发火会造成自动机故障的时间范围为 6~34 ms。

4.3 稳定浮动时迟发火影响

与首发和起始浮动时迟发火影响分析相同，仿

真计算得到稳定浮动时弹药在 1~4 ms 延迟发火情况下闭座相对于炮箱位移如图 20 所示。

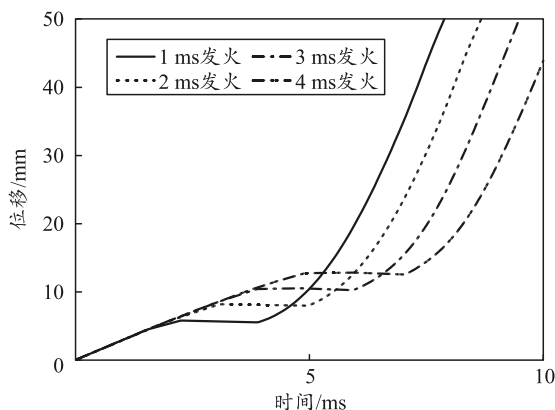


图 20 稳定浮动时弹药在 1~4 ms 延迟发火情况下闭座相对于炮箱位移

由上图可知：与首发和起始浮动时相同，在相应的延迟发火时间之前，闭座同样存在反跳，但在发火时间到来后，在炮膛合力作用下，闭锁块楔紧闭座，闭座很快相对于炮箱的位移基本不变；因此，稳定浮动时弹药在正常 1~4 ms 发火情况下，炮闭锁可靠，不会由于迟发火而导致自动机出现损伤故障。

根据稳定浮动时闭座 2 次到达 20 mm 自由行程的时间 8.6 ms 和 34.5 ms，以 1 ms 延迟为间隔，通过仿真计算得到了闭座在 8.6 ms 和 34.5 ms 时间基础上具体会造成迟发火故障的时间范围。6~11 ms 延迟情况下闭座相对于炮箱位移如图 21 所示，30~35 ms 延迟情况下闭座相对于炮箱位移如图 22 所示。

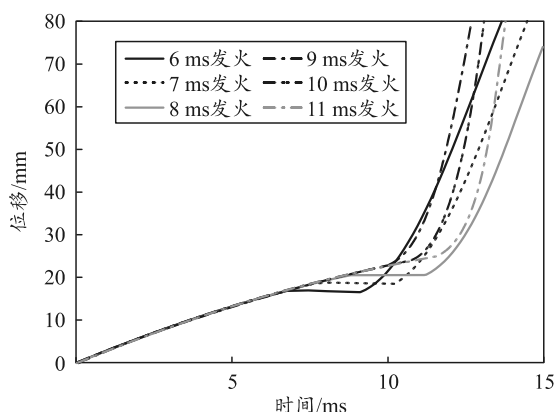


图 21 6~11 ms 延迟情况下闭座相对于炮箱位移

由上图可知：弹药在 8 ms 时间内发火时，闭座虽然会存在反跳，但均会在炮膛合力作用下被闭座楔紧，使闭座相对于炮箱的位移在一定时间范围内几乎不变；但当弹药发火时间为 9 ms 后，闭座相对

于炮箱的位移持续增加，闭座没有被闭锁块楔紧，炮闭锁不可靠。

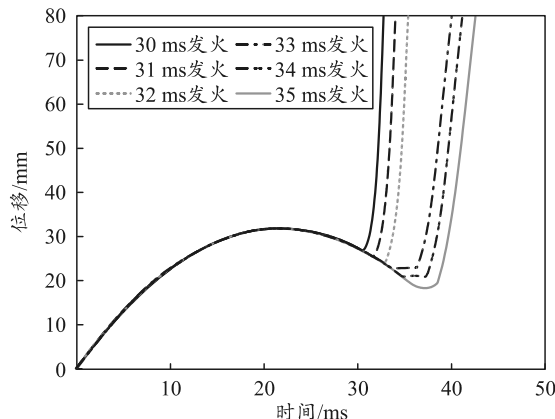


图 22 30~35 ms 延迟情况下闭座相对于炮箱位移

由上图可知：弹药在 32 ms 发火时间之前，闭座相对于炮箱的位移持续变化，闭座没有被闭锁块楔紧，炮闭锁不可靠。当弹药发火时间在 33 ms 之后，闭座在一定时间内相对于炮箱的位移几乎不变，即闭座被闭锁块楔紧；此时间之后，炮闭锁可靠，不会由于迟发火而导致自动机出现损伤故障。

综上所述，稳定浮动时闭座闭锁击发后，弹药在正常 1~4 ms 发火时间范围内炮闭锁可靠，不会由于迟发火而导致自动机出现损伤故障。根据第 1 次反跳超过 20 mm 自由行程的时间，以 1 ms 延迟为间隔，仿真得到了迟发火会造成自动机故障的时间范围为 9~32 ms。

5 结论

笔者通过对某内能源自动机尤其是其闭锁时的结构原理分析，建立该自动机闭锁击发时的虚拟样机模型，对首发、起始浮动和稳定浮动时闭座自由反跳进行动力学仿真，并与实验结果进行对比，验证了所建虚拟样机的可信性。建立闭座相对于炮箱位移的判据，仿真得到 3 种情况下迟发火会对自动机造成的影响。仿真实验结果表明：

1) 3 种情况下闭座自由反跳最大距离均超过了 20 mm 自由行程，其中起始浮动时闭座最大反跳距离 > 稳定浮动 > 首发，且闭座自由反跳仿真结果与实验结果对比，较为吻合。

2) 以 1 ms 延迟为间隔，对弹药正常 1~4 ms 发火情况进行仿真，得到了 3 种情况下弹药正常 1~4 ms 发火时闭座均闭锁可靠，不会由于迟发火而导致自动机出现损伤故障。