

doi: 10.7690/bgzdh.2023.10.012

基于 ADAMS 的引信保险机构运动学建模仿真分析

陈瑾¹, 彭志凌¹, 段昊言¹, 于伟国², 张洪涛², 李红社³, 侯强¹

(1. 中北大学机电工程学院, 太原 030051;

2. 中国兵器工业集团北方华安工业集团有限公司, 黑龙江 齐齐哈尔 161000;

3. 中国兵器工业集团淮海工业集团有限公司, 山西 长治 046012)

摘要: 针对某型破甲弹发生膛炸问题, 对引起膛炸的原因进行故障树定性分析, 利用 ADAMS 软件对该引信尾部的保险机构进行运动学仿真。得出回转体及三卡板角位移在初始速度为 1 050 m/s 下随时间变化的曲线, 经分析发现弹丸在身管内同时具有推进运动和旋转运动, 在此初速下存在回转到位有反转运动的可能, 从而引起导爆、传爆机构工作不正常, 导致膛炸。结果表明: 该方法可被计算其他参数对其他引信保险机构可靠性的影响所借鉴, 同时也为后续引信机构产品的设计改进提供依据。

关键词: 破甲弹; 引信; 保险机构; ADAMS; 运动学分析

中图分类号: TJ43 **文献标志码:** A

Kinematics Modeling and Simulation Analysis of Fuze Safety Mechanism Based on ADAMS

Chen Jin¹, Peng Zhiling¹, Duan Haoyan¹, Yu Weiguo², Zhang Hongtao², Li Hongshe³, Hou Qiang¹

(1. College of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. North Hua'an Industrial Group Co., Ltd., China North Industries Group Corporation Limited, Qiqihaer 161000, China;

3. Huaihai Industrial Group Co., Ltd., China North Industries Group Corporation Limited, Changzhi 046012, China)

Abstract: Aiming at the bore burst problem of a certain type of armor-piercing projectile, the fault tree qualitative analysis of the causes of bore burst was carried out, and the kinematics simulation of the safety mechanism of the fuze tail was carried out by using ADAMS software. The curves of the angular displacement of the revolving body and the three clamping plates varying with time at the initial velocity of 1 050 m/s are obtained. It is found that the projectile has both propulsive motion and rotational motion in the barrel, and there is a possibility of reverse motion when the projectile rotates to its position at this initial velocity, which causes the abnormal operation of the detonating and detonating mechanisms and leads to the chamber explosion. The results show that the method can be used for reference to calculate the influence of other parameters on the reliability of other fuze safety mechanism, and also provide a basis for the design and improvement of subsequent fuze mechanism products.

Keywords: armor-piercing projectile; fuze; safety mechanism; ADAMS; kinematics analysis

0 引言

随着国际形势的日益严峻, 战场的武器呈现日趋多样化、精细化的发展。破甲弹早在二战时期就被使用过的弹种, 在现今战场上仍是较为重视的主体; 因此, 保证其正常工作、提高其工作可靠性一直是关注的重点, 而引信机构作为维持破甲弹高效工作的重要部分之一, 亦是研究中的关键一环。周金波^[1]采用分离式串联破甲战斗部, 对破甲弹引信进行闭合开关设计。李剑锋^[2]提出了某种嵌入式软件结构以应对破甲弹引信纠错能力差的情况。由此发现, 虽然对于引信可靠性的研究越来越广泛, 但以引信保险机构为研究主体的仍居少数。笔者针对

某型破甲弹发生膛炸现象, 通过建模对该型破甲弹尾部保险机构进行研究, 探究在引信保险机构初速为 1 050 m/s 并施加一定转速的情况下, 结合 ADAMS 软件进行仿真分析和试验验证, 对于相关的引信保险机构的研究具有重要的理论意义和工程价值。

1 某型破甲弹引信保险机构作用原理

以某型破甲弹为例, 其主要是由引信、回转部件、三卡板部件、传爆部件以及一些连接组件组成。在其发射时, 通过给电底火通入发火电流, 弹丸借助发射药点燃后释放的高温高压的作用下离开炮膛, 三卡板部件受力依次做旋转运动, 此时回转

收稿日期: 2023-06-10; 修回日期: 2023-07-12

基金项目: 毁伤技术重点学科研究基金(DXMBJJ2020-01)

作者简介: 陈瑾(1997—), 女, 安徽人, 硕士。

体在轴心力作用下保持保险状态^[3]。在破甲弹弹丸飞离炮口一段时间后，弹丸的飞行速度逐渐降低，此时回转体部件在回转弹簧扭力作用下开始做回转运动。当撞击目标时，在装药接触面有金属药型罩，高爆炸药作用后形成金属射流达到侵彻装甲的目的^[4-7]。

2 故障树分析定性分析

故障树分析方法 (fault tree analysis, FTA) 是一种在实际工程中能够保障和改进系统可靠性、安全性的手段。该方法可使人了解某些事件的组合导致系统的故障，并计算相关的发生概率，然后通过这些事件的组合以及发生概率可规避某些故障或者改进某些措施。

对引起该型破甲弹膛炸的原因进行故障树定性分析，由于笔者研究重点是引信机构影响的相关因素，因此接下来主要是针对膛内引信作用进一步分析。障树分析如图 1 所示。

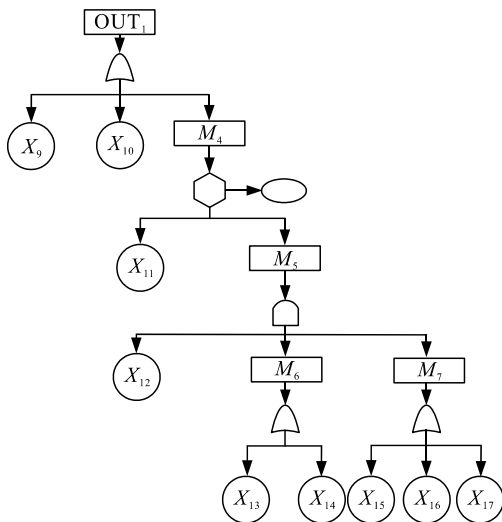


图 1 故障树分析

图中：OUT₁ 为引信问题；X₉ 为传爆药柱自炸；X₁₀ 为导爆件自炸；X₁₁ 为电雷管自炸；X₁₂ 为压电晶体膛内累积电荷达到电雷管的发火电压；X₁₃ 为开关内有金属异物；X₁₄ 为空气隙被击穿；X₁₅ 为制转销漏装；X₁₆ 为卡板簧漏装或折断；X₁₇ 为回转簧漏装或折断；M₄ 为传爆序列作用；M₅ 为电雷管被引爆；M₆ 为头部开关闭合；M₇ 为回转体回转到位^[8]。

通过故障树分析，此处不考虑发射过程和弹体等因素，重点在于引信机构因素，结合相关经验获取以及实地现场探寻，未发现自炸现象，可得出导致破甲弹发生膛炸的主要影响因素是传爆药柱、导爆件或是电雷管发生自炸。

3 破甲弹引信尾部机构仿真分析

事先已对该破甲弹的头部机构进行仿真分析，得出该部位机构不是引起膛炸的主要原因；因此，笔者主要针对破甲弹引信尾部机构进行仿真分析。

3.1 引信尾部保险机构建模

利用 Solidworks 软件建立该破甲弹尾部保险机构，如图 2、3 所示，再导入至仿真软件 ADAMS 中，具体建模流程如图 4 所示。

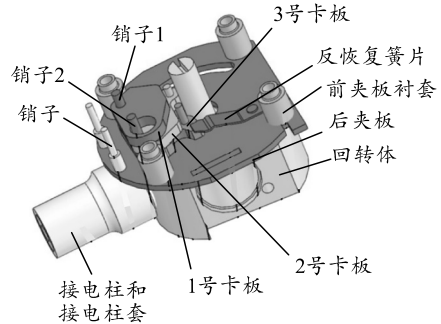


图 2 去本体后的破甲弹引信模型

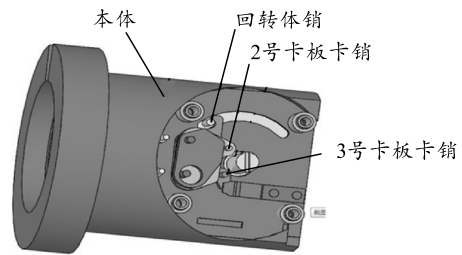


图 3 破甲弹引信模型

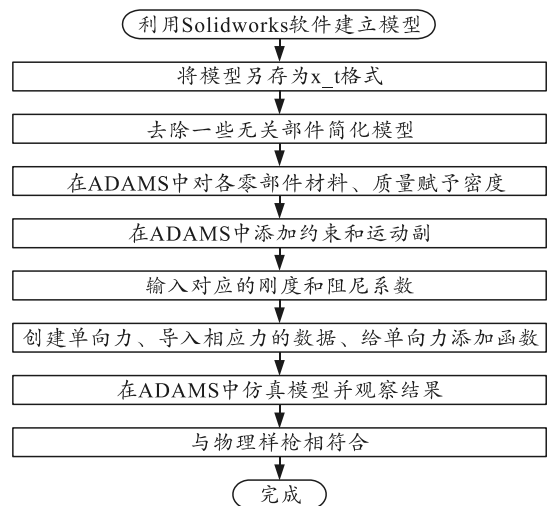


图 4 建模流程

在此建模流程下可以得到简化后的模型，如图 5 所示。在图 4 所示的建模流程中，对于卡板 1、2、3 号和回转体部件，分别添加转动副，在每个销钉和后夹板之间以及本体与地面之间添加固定副，并在相应部件之间增加接触，使之具有一定限制且之

后能够按照相应的路径移动。将真实的弹簧更换成单元扭转弹簧，并指定对应适当的刚度和阻尼系数^[9]。后者依据保险解除时间在最大膛压时标定得到阻尼为 0.002 7 N·s/mm。最后将破甲弹撞击模拟分析得到的加速度转化成各个零件的载荷导入该模型中。在 ADAMS 中可以创建单向力并且此力的大小为对应的样条曲线载荷，用 CUBSPL 函数来拟合样条曲代替给整体添加场加速度^[10-11]。

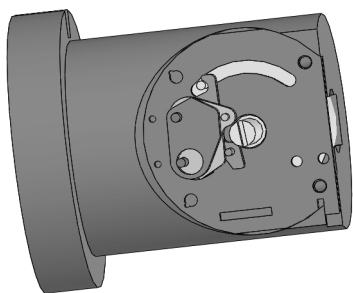


图 5 破甲弹引信简化后的模型

对于扭转弹簧，已知其圆形弹簧中径 D 为 4.83 mm，整体弹簧的有效螺旋圈数 n 为 3，弹簧丝直径 d 为 0.6 mm，装配时的扭力矩为 4.9 N·cm。扭转弹簧的刚度为：

$$k_T = T/\phi = EI/180Dn \quad (1)$$

式中： E 为圆形弹簧螺丝材料的垂直轴向惯性模量，再根据圆形弹簧螺丝材料中的机械刚性设计表得知 $E=197\ 000$ MPa； I 为圆形弹簧和螺丝材料截面的径向轴惯性矩：

$$I = \pi d^4/64 \quad (2)$$

代入数据可得扭簧刚度为：

$$k_T = \frac{T}{\phi} = \frac{EI}{180Dn} = \frac{197\ 000 \times (\pi \times 0.6^4/64)}{180 \times 4.83 \times 3} = 0.4803 \text{ N}\cdot\text{mm}/(^{\circ}) \quad (3)$$

对于卡板弹簧，已知其圆形弹簧中径 D 为 1.02 mm，整体弹簧的有效螺旋圈数 n 为 3，弹簧丝直径 d 为 0.33 mm。

代入数据可得卡板簧刚度为：

$$k_T = \frac{T}{\phi} = \frac{EI}{180Dn} = \frac{197\ 000 \times (\pi \times 0.33^4/64)}{180 \times 1.02 \times 3} = 0.2081 \text{ N}\cdot\text{mm}/(^{\circ}) \quad (4)$$

卡板簧在装配时被压弯 70° ，已知其压弯 90° 时的扭力矩为 0.88 N·cm，则初始扭力矩设为：

$$0.88 \times 70^{\circ}/90^{\circ} = 0.6844 \text{ N}\cdot\text{cm} \quad (5)$$

3.2 引信尾部保险机构性能仿真

根据导入的负载作用时间来设置仿真时间以

及运行的步数，在后处理模块添加曲线，开始运行，得到卡板机构与垂直转子在发射初始速度 1 050 m/s 下回转体角位移随时间变化曲线，如图 6 所示。卡板 1、2、3 号角位移曲线分别如图 7—9 所示。

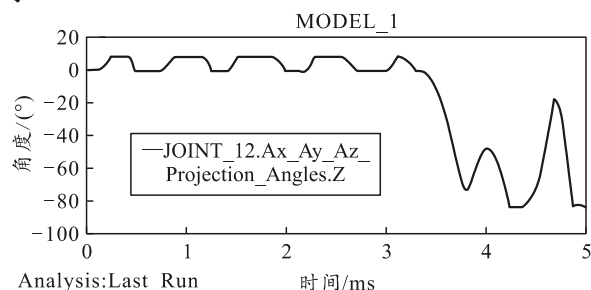


图 6 回转体角位移曲线

由上图分析可得，在 3.3 ms 时回转部件开始回转，并在 4.2 ms 时转到 83.4878° ，接着在 4.3 ms 时回转部件开始进行回转并继续循环往复运动。回转部件会发生回转，是因为随着破甲弹弹丸从管中射出后旋转速度逐渐减小，偏心惯性矩减小，由于此时回转扭簧扭力大于偏心惯性矩跟摩擦力之和。

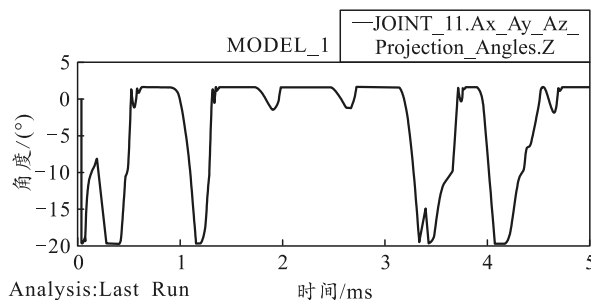


图 7 1号卡板角位移曲线

由上图分析可得，卡板 1 号在惯性力作用下开始旋转，最大旋转角度为 19.6208° ，卡板 1 号去除卡板簧导致了有回转现象的出现。

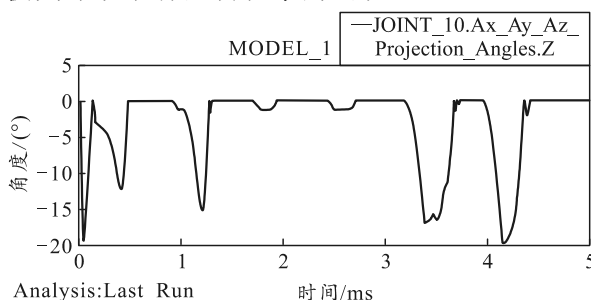


图 8 2号卡板角位移曲线

由上图分析可得，卡板 2 号比 1 号稍迟一点儿进行转动，这与实际情况相对应。在 3.5 ms 时转至波峰位置 19.7226° 。然后卡板 2 号开始类似 1 号开始回转，之后在 0.127 1 ms 时转回起始位置，并在此做循环往复运动。

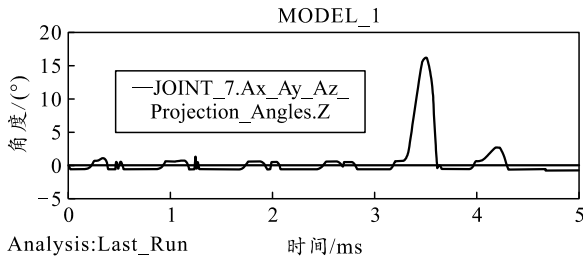


图 9 3号卡板角位移曲线

由上图可知，卡板 3 号在 1、2 号转动后开始旋转，并在 3.5 ms 时达到波峰位置，即此时旋转角度最大，为 16.305 2°。

3.3 仿真结果

对破甲弹碰撞实验进行仿真分析，运用 ADAMS 软件，可以得到在 1 050 m/s 的初始条件下破甲弹碰撞冲击实验数据。根据这些实验数据，构建破甲弹尾部机构动力学仿真模型，通过使用后处理软件，得到该破甲弹引信尾部保险机构的运动数据，并得出如表 1 所示结论。

表 1 各部件运动学仿真结果

目标指	最大转角/(°)	加速度作用时间/ms
回转体	83.494 2	4.200 0
1号卡板	19.620 8	0.000 8
2号卡板	19.722 6	0.035 5
3号卡板	16.305 2	3.500 0

上表中得到的各个角度数据，是基于模型之间存在一定间隙的情况。在实际情况下，当所有卡板与回转体部件位于起始位置时，在扭转弹簧的作用下它们会和卡销紧密接触，但在仿真软件中进行实际仿真时，这样的提前紧密接触就会造成很大的接触力，继而影响仿真得到的数据。所以可观察到图像曲线刚开始先向着接触的方向进行运动产生碰撞继而导致角度变化，这是由于避免了卡板与回转体部件在刚开始时的紧密接触，让它们之间提前存在一定的距离。

通过分析仿真数据可知，在膛底底部压力的影响下，破甲弹弹丸受到向前推进且旋转的运动。而卡板 1、2、3 运动到特定位置后又继续反转，且反转的过程随着破甲弹弹丸速度的降低呈现周期形式的循环递减运动。分析回转部件的运动过程可以看出：在初始经验条件 1 050 m/s 的速度下，回转体

在销子释放后仍能回转到位，但造成膛炸现象的原因是，回转体回转到位之后继而又发生了反回转运动。

4 结论

针对某型破甲弹发生膛炸的现象，通过 ADAMS 软件对该引信保险机构进行动力学仿真分析。设置初始条件，即初始速度为 1 050 m/s，在此基础上添加相应的转速，以此模拟破甲弹弹丸发射时的情况。根据仿真得出的结果显示，在初始条件为 1 050 m/s 速度的条件下，由于出现回转部件在身管内偏心惯力矩大于扭力簧力矩跟摩擦力之和的现象，仍然保持原位置；之后若随着破甲弹的速度减小出现和上述相反的现象，则回转体在正常回转会后会出现反转运动，该反转运动是导致破甲弹出现膛炸的直接原因。

参考文献:

- [1] 周金波. 新型破甲弹主引信闭合开关设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [2] 李剑峰. 电子时间引信射频装定技术的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [3] 曹莹. 引信双自由度后坐保险机构理论研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [4] 李智军. 某迫击炮弹电子时间引信安全和解除保险装置设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [5] 袁帅. 引信后坐液体阻尼保险技术理论研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [6] 刘靖雷, 袁士伟, 王蒙. 引信电子安全与解除保险装置功能检测仪的设计[J]. 制导与引信, 2011, 32(2): 35-38, 49.
- [7] 马建. 某单兵制导破甲战斗部威力性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2013.
- [8] 侯强. 引信机构运动学建模及可靠性分析研究[D]. 太原: 中北大学, 2020.
- [9] 邓鹏. 基于 MEMS 安全系统的传隔爆性能研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2017.
- [10] 刘奇, 李娜, 李美亚, 等. 提高破甲弹破甲威力的引信帽褶台结构[J]. 探测与控制学报, 2020, 42(2): 10-13.
- [11] 马婷霞. 一种滑膛霰弹枪用碰炸引信保险机构[J]. 兵工自动化, 2020, 39(5): 73-75.