

基于FMECA的某自动步枪发射机构可靠性分析

李定哲¹, 景春温², 管小荣¹

(1.南京理工大学机械工程学院, 南京 210094; 2.重庆建设工业(集团)有限责任公司, 重庆 400054)

摘要: **目的** 分析某自动步枪发射机构的可靠性。**方法** 用故障模式、影响及危害性分析(FMECA)的方法对自动武器发射机构进行危害度分析,通过参考GJB 450A和GJB 1391制定危害程度的评判参考标准,列举出故障,并对故障的危害程度进行评分,找出危害影响最严重的故障优先进行可靠性分析。再通过三维建模软件和动力学分析软件对发射机构进行动力学仿真,将动力学仿真得到的结果导入有限元仿真软件,通过力学分析得到零部件的最大应力,运用应力-强度干涉理论求出可靠度。最后给出严重故障的可靠度分析。**结果** 在FMECA分析综合评分后,得出某自动步枪发射机构最严重的故障模式是超越保险异常击发。通过ADAMS仿真进行受力分析,发射机构中受力最大的零件为单发阻铁和击锤,使用应力-强度干涉理论进行可靠度计算,计算得到单发阻铁的基础可靠度为99.952%,击锤的基础可靠度为99.955%,发射机构的基础可靠度为99.907%。**结论** 发射机构的基础可靠度非常高,因此影响发射机构可靠度的因素主要是机构运动不可靠。在自动武器非正常操作时,将导致零部件位置异常,从而出现任务不可靠。可以通过改进零部件的方法防止故障发生,提高发射机构的任务可靠度。

关键词: 发射机构; 可靠度分析; FMECA; 超越保险异常击发; 任务可靠性; 基础可靠性

中图分类号: TJ22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2022)06-0035-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.06.006

Reliability Analysis of an Automatic Rifle Firing-mechanism Based on FMECA

LI Ding-zhe¹, JING Chun-wen², GUAN Xiao-rong¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Chongqing Jianshe Industry (Group) Co., Ltd., Chongqing 400054, China)

ABSTRACT: This paper aims to analyze the reliability of an automatic rifle firing-mechanism. The fault mode, impact and hazard analysis (FMECA) was used to analyze the hazard degree of automatic weapon launching mechanism. By referring to GJB-450a and GJB1391, a reference standard for evaluating the degree of damage was formulated and the fault was listed, as well as the degree of damage of the fault was scored, thereby identifying the fault with the most serious impact and conducting reliability analysis with it preferentially. Then, the dynamic simulation of the launching mechanism was carried out by using 3D modeling software and dynamics analysis software, and the results of dynamics simulation were imported into the finite element simulation software. The maximum stress of the parts was obtained by mechanical analysis, and the reliability was calculated by using stress-intensity interference theory. Finally, the reliability analysis of serious faults is given. After FMECA analyzed the

收稿日期: 2022-05-02; 修订日期: 2022-06-07

Received: 2022-05-02; Revised: 2022-06-07

作者简介: 管小荣(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为单兵智能装备。

Biography: GUAN Xiao-rong (1979-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: individual intelligent equipment.

引文格式: 李定哲, 景春温, 管小荣. 一种考虑环境因素的自动步枪可靠性分析方法[J]. 装备环境工程, 2022, 19(6): 035-043.

LI Ding-zhe, JING Chun-wen, GUAN Xiao-rong. Reliability Analysis of an Automatic Rifle Firing-mechanism Based on FMECA [J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(6): 035-043.

comprehensive score, it was concluded that the most serious failure mode of an automatic rifle firing-mechanism was the exceedance insurance abnormal firing. ADAMS simulation was used to conduct stress analysis, and the biggest stress parts in the launching mechanism were semi-automatic sear and hammer. The stress-intensity interference theory was used to calculate the reliability, and the basic reliability of semi-automatic sear was 99.952%, the basic reliability of hammer was 99.955%, and the basic reliability of the launching mechanism was 99.907%. The foundation reliability of launching mechanism is very high, so the main factor affecting the reliability of launching mechanism is the unreliability of mechanism motion. The abnormal operation of automatic weapons will lead to the abnormal position of parts, resulting in unreliable tasks. The failure can be prevented by improving parts and components to enhance the mission reliability of launch mechanism.

KEY WORDS: firing-mechanism; reliability analysis; FMECA; exceedance insurance abnormal firing; task reliability, basic reliability

自动步枪发射机构可靠性主要指自动步枪发射机构的动作可靠性。发射机构的可靠性定义为：自动步枪发射机构在规定的寿命射弹数量内，在单发、连发、保险及发射方式转换条件下，完成规定机构动作（包括不到位保险解脱时机、击锤扣压与解脱逻辑动作、保险动作等），保持充足击锤打击能量的能力^[1]。自动步枪发射机构的可靠性直接影响射击功能的正常发挥，出现异常将导致意外击发，产生人员伤亡，甚至影响战争胜负^[2]。

FMECA 分析方法历经半个世纪的发展，在各领域有了完整的故障预测体系，应用广泛。国外起步较早，Chase 等^[3]利用直接线性法建立了机构的闭环运动学方程，并在此基础上建立了机构运动的相关误差模型，通过适当的假设条件，计算出了机构的动作可靠度。在 20 世纪末，可靠性研究逐渐向集成化、智能化和自动化方向发展。到 21 世纪，可靠性研究已经发展到全面整合阶段^[4]。目前，新的可靠性研究方法和技术层出不穷，蓬勃发展。

国内可靠性研究起步较晚，早先可靠性理论基础薄弱，可靠性数据缺乏，并且研究缺乏先导性和系统性，制约着我国可靠性研究的发展^[5-6]。从 20 世纪 70 年代开始，我国开始重视可靠性的研究，冯元生教授及其科研团队对可靠性研究作出了重要贡献^[7-10]。20 世纪 80 年代，我国引进了 FMECA 分析方法，制定了一系列可靠性工程的国家技术标准，武器可靠性的国家技术标准正在逐渐细化与完善。

1 故障模式、影响及危害性分析

故障模式、影响及危害性分析法（FMECA 分析法）是 GJB 450A—2004《装备可靠性工作通用要求》^[11]中重要的可靠性分析方法之一，FMECA 分析需要将某自动步枪发射机构所有可能出现的故障进行列举，评估每个可能发生的故障对发射机构的影响。采用多个评分因素对发射机构进行综合评分，找到自动武器发射机构在设计中最为薄弱的环节，并对其进行可靠性分析，为设计的优化改进提供依据。

1.1 FMECA 评判标准

使用综合评分法对发射机构进行危害性分析，是通过把所有的故障按照统一的评分因素进行评分，采用连续相乘的方法，即通过式（1）计算危害度 C_f ，危害度 C_f 的数值越大，则说明该故障的危害程度大，需要优先考虑和解决。表 1 列出了危害等级准则，表 2 列出了某自动步枪发射机构的故障模式的评定因素及评定标准^[4]。

$$C_f = \prod_{i=1}^n F_i \quad (1)$$

式中： F_i 是各个评分因素的评分； n 是评分因素的数量。

表 1 危害等级准则
Tab.1 Hazard rating

类别	危害等级	说明准则
I 类	灾难级	将造成人员死亡，造成系统致命损坏
II 类	致命级	将造成人员重伤，系统严重损坏，经济损失，且任务失败
III 类	临界级	将造成人员轻伤，系统轻微损坏，且任务推迟
IV 类	轻微级	将不会对人员和系统造成伤害和损坏，但可能导致系统的性能下滑

1.2 建立机构运动模型

建立机构运动模型可以更好地判断发射机构中各个零件之间相互作用、相互约束的关系，从而能够更加准确地判断各种故障对发射机构的影响。建立发射机构运动模型，为基础可靠性的计算提供依据，更加直观地判断各个零部件的受力情况，同时也是定性分析发射机构任务可靠性的参考模型。某自动步枪发射机构主要由 10 个关键的零件组成，如图 1 所示。

发射机构是控制击发机构待发和击发的机构，在各种使用条件下，发射机构的动作应确实可靠。在单

表 2 评分因素取值
Tab.2 Evaluation criterion

评分因素	危害等级	评分 F_i
故障对环境的影响	灾难级 (人员死亡)	5.0
	致命级 (人员重伤)	3.0
	临界级 (人员轻伤)	1.2
	轻微级 (无人员受伤)	0.8
故障对发射机构的影响和后果	致命级 (机构完全损坏)	1.5
	临界级 (机构轻微损坏)	1.0
	轻微级 (不丧失功能)	0.5
故障对自动武器其他机构的影响	影响 2 个以上的机构	2.0
	影响 1 个机构	1.0
	对其他机构无太大影响	0.5
故障发生频率	经常会发生	1.5
	有可能发生	1.0
	几乎不会发生	0.7
需要更改设计的程度	需要大量改变设计	1.2
	需要相似设计	1.0
	小幅调整设计	0.8

发状态下, 阻铁将随扳机一起旋转, 扣压扳机, 击锤将会解脱扣合, 并撞击击针, 完成击发动作。在枪机框后坐的过程中, 将击锤压倒, 击锤与阻铁扣合, 当枪机框复进, 松开扳机时, 击锤重新与扳机扣合, 完成单发。在连发状态下, 保险下端压住阻铁, 阻铁不随扳机转动, 扣压扳机, 击锤将会解脱扣合, 并撞击击针, 完成击发动作。在枪机框后坐的过程中, 将击锤压倒, 若扣住扳机不放, 当枪机框复进到位, 不到位保险被枪机框压倒, 不到位保险和阻铁对击锤的扣合解脱, 将再次击发, 实现自动武器的连发功能^[12]。

1.3 发射机构 FMECA 分析

某自动步枪发射机构典型故障的描述和原因见表 3。通过表 3 中对某自动步枪发射机构的故障原因分析, 严格按照表 2 的取值标准, 运用危害度计算公式, 对发射机构进行故障危害性分析^[13]。

由表 4 可知, 某自动步枪发射机构故障中危害度最大的故障为在射手错误操作下导致发射机构超越保险异常击发。后文将基于超越保险异常击发的故障模式对某自动步枪发射机构进行改进。

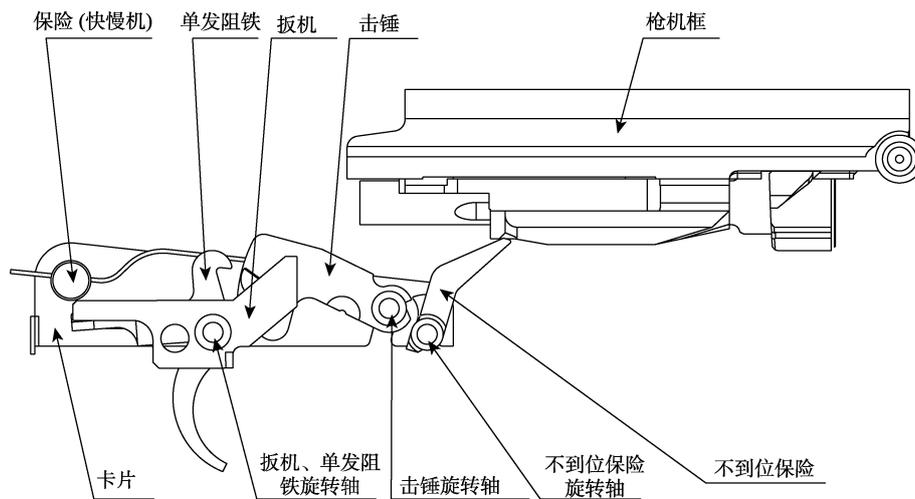


图 1 某自动步枪发射机构
Fig.1 Firing-mechanism diagrammatic drawing

表 3 发射机构 FMECA 分析
Tab.3 Firing-mechanism FMECA analysis

故障模式	代号	故障原因	故障影响	危害等级	补偿措施
不击发 (击发无力)	1	击锤打击击针的能量不足	发射机构失效	IV	调整击锤簧
不到位保险故障	2	击锤提前解脱扣合, 或者扳机到位击锤不能解脱扣合	发射机构失效	III	调整不到位保险或调整不到位保险簧
扳机不复位	3	松开扳机, 扳机无法回到初始位置	发射机构失效	IV	调整保险位置或调整扳机簧
单发阻铁不起作用	4		发射机构失效	IV	更换单发阻铁或单发阻铁簧
单打连	5	快慢机位置错误	发射机构任务失败	II	调整快慢机位置
	6	单发阻铁故障			更换单发阻铁或单发阻铁簧
连发挂机	7	快慢机位置错误	发射机构任务失败	II	调整快慢机位置

续表 3 发射机构 FMECA 分析
Tab.3 Firing-mechanism FMECA analysis

故障模式	代号	故障原因	故障影响	危害等级	补偿措施
	8	击锤卡滞	发射机构任务失败	II	更换击锤或击锤簧
	9	不到位保险卡滞	发射机构任务失败	II	更换不到位保险或调整不到位保险簧
超越保险异常击发	10	射手错误操作, 连发状态下, 扣压扳机, 将保险装置对正“0”位置, 拉动自动机, 自动步枪将直接击发	自动步枪异常击发	I	改进发射机构零部件或令射手严格按照规范进行操作
	11	快慢机或扳机磨损	自动步枪异常击发	I	更换快慢机或扳机

表 4 发射机构危害度综合评分
Tab.4 Firing-mechanism hazard rating scale

故障代码	评分因素					危害度评分 C_f
	故障对环境的 影响	故障对发射机构的 影响和后果	故障对自动武器其他 机构的影响	故障发生 频率	需要更改设 计的程度	
1	0.8	1.0	1.0	0.7	0.8	0.45
2	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8
3	0.8	1.0	0.5	0.7	1.0	0.6
4	1.2	1.0	0.5	1.0	1.0	0.6
5	3.0	1.5	1.0	1.0	1.0	4.5
6	3.0	1.0	1.0	0.7	1.0	2.1
7	3.0	1.5	1.0	1.0	1.0	4.5
8	3.0	1.0	1.0	0.7	1.0	2.1
9	3.0	1.0	1.0	0.7	1.0	2.1
10	5.0	1.0	1.0	1.5	1.2	9
11	5.0	1.0	1.0	0.7	1.0	3.5

2 某自动步枪发射机构基础可靠性分析

单打连、连发挂机故障与超越保险异常击发故障的原因为某自动步枪发射机构中部分零部件位置关系错误, 但部分零部件断裂也可能导致上述故障的出现, 所以需要计算某自动步枪发射机构中零件的基础可靠性。计算发射机构的基础可靠性应使用串联模型, 即发射机构中任意某个零件不可靠, 则发射机构不可靠^[4]。通过对某自动步枪发射机构进行动力学仿真分析, 由仿真结果得到受力较大的 2 个零件分别为击锤和单发阻铁。

2.1 建立动力学仿真模型

利用 Adams 软件建立某自动步枪发射机构动力学仿真分析模型, 在枪机框上添加能够前后运动的移动副, 在扳机、单发阻铁、击锤和不到位保险上添加旋转副, 并在扳机、击锤、不到位保险、枪机框、单发阻铁处按照实际参数设置弹簧。仿真模型如图 2 所示。

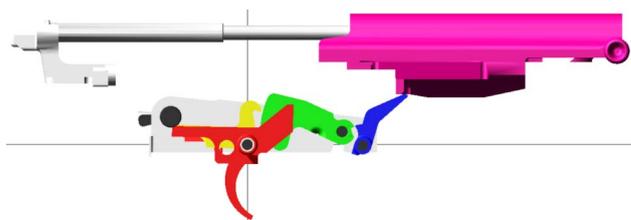


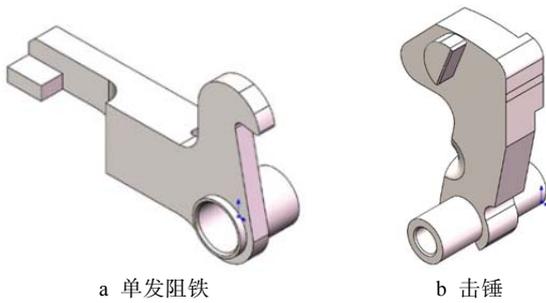
图 2 某自动步枪发射机构动力学仿真模型
Fig.2 Simulation model of the dynamics of an automatic rifle firing mechanism

2.2 建立单发阻铁和击锤的三维模型

利用 SOILDWORKS 软件对发射机构的击锤和单发阻铁进行三维建模, 单发阻铁和击锤的三维模型如图 3 所示。

2.3 添加约束和载荷

将 Adams 仿真中有关于单发阻铁的力全部绘制在同一坐标系下。在 0.2 s 前, 单发阻铁随着扳机转动, 并与击锤产生了接触; 在 0.2 s 时刻, 扳机与击锤解脱扣合; 在 0.4 s 时刻, 击锤被枪机框压下, 与单发阻铁相互碰撞, 此时各条受力曲线均达到峰值。



a 单发阻铁 b 击锤

图 3 三维模型

Fig.3 Three-dimensional model: a) semi-automatic sear; b) hammer

将 Adams 仿真所得受力图中的最大力向上取整, 得到单发阻铁和击锤所承载荷最大时的受力情况。单发阻铁在击锤被枪机框压下, 与单发阻铁扣合前相互碰撞, 受力最大如图 4 所示。

由图 4 中数据可知, 击锤与单发阻铁间碰撞的最大冲击载荷为 462.25 N, 单发阻铁簧的最大受力为 439 N, 弹簧扭矩的力矩最低为 78.8 N·mm。以仿真分析得到的最大载荷, 添加约束和载荷, 如图 5 所示。在单发阻铁头部添加了与击锤碰撞产生的力 (470 N), 在旋转轴处添加了弹簧扭矩和固定约束。

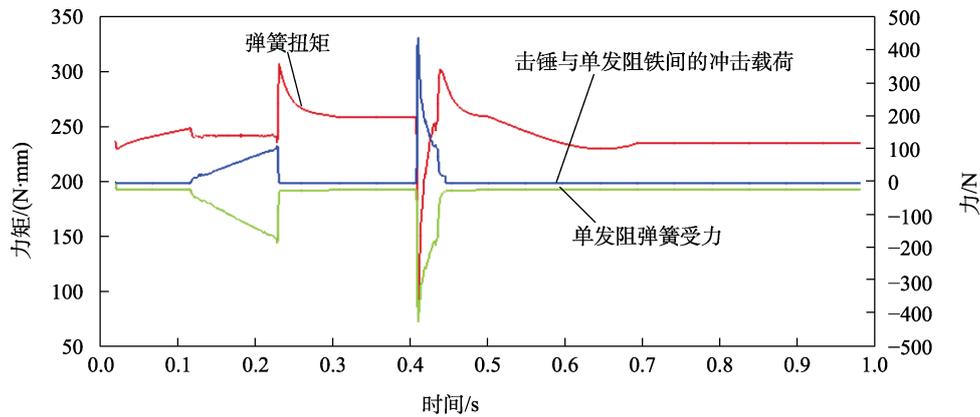


图 4 单发阻铁受力

Fig.4 Semi-automatic sear force diagram

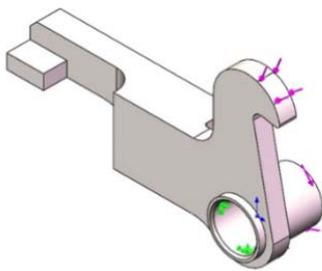


图 5 单发阻铁约束与载荷情况

Fig.5 Semi-automatic sear force condition

将 Adams 仿真中有关于击锤的力全部绘制在同一坐标系下。在 0.35 s 时刻, 枪机框后坐撞击击锤, 达到第一处受力峰值; 在 0.4 s 时刻, 击锤被枪机框压下, 与单发阻铁相互碰撞, 达到第二处峰值。这说明在单发阻铁承受最大载荷的同时, 击锤也承受了最大的外部载荷, 此时击锤承受了与枪机框的碰撞, 并被压下与单发阻铁扣合, 同时也受到了来自不到位保险的力和击锤簧所产生的扭矩。其受力情况如图 6 所示。

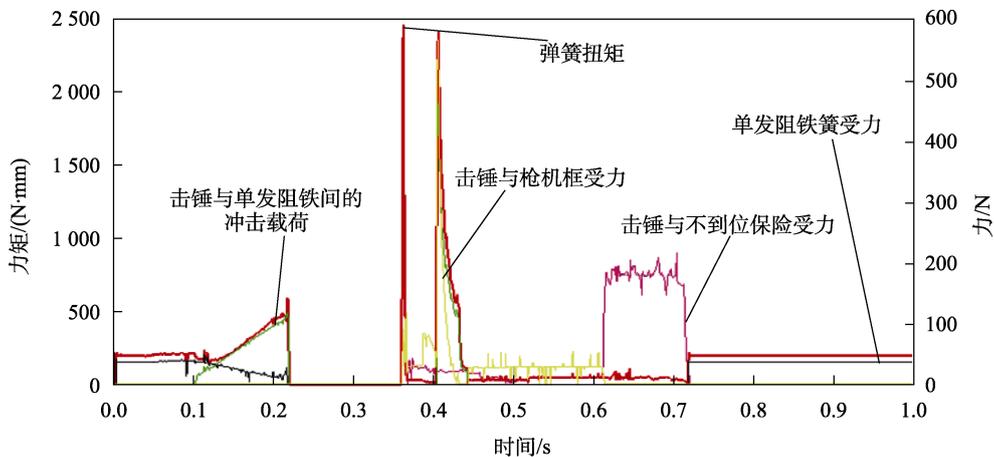


图 6 击锤受力 (未包含与击针碰撞的力)

Fig.6 Hammer force diagram (the force of collision with the striking pin is not included)

由图 6 可知, 击锤与单发阻铁间碰撞的最大冲击载荷为 462.25 N, 击锤与枪机框产生碰撞的最大受力为 566.5 N, 击锤与不到位保险产生的碰撞在 0.4 s 时的受力为 35 N, 弹簧扭矩的最大力矩为 2 464.07 N·mm。以仿真分析得到的最大载荷, 添加约束和载荷, 如图 7 所示。因为枪机的后坐速度为 8.5~9.0 m/s, 为确保击

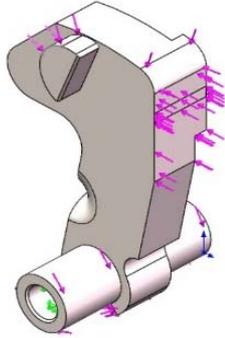


图 7 击锤约束与载荷情况
Fig.7 Hammer force condition

锤的可靠性, 在与枪机框接触的部分添加了 600 N 的力, 在与单发阻铁接触的部分添加了 470 N 的力, 并在旋转轴处添加了弹簧扭矩和固定约束。

2.4 计算基础可靠性

使用应力-强度干涉理论进行可靠度计算^[15-18]。在计算可靠性时, 由于没有足够的样本, 直接使用最大应力进行计算。使用 45 钢的材料属性计算某自动步枪发射机构零件的可靠性。查阅资料得, 45 钢的屈服强度为 355 MPa, 所以 45 钢的平均应力为 $\bar{\mu}_s = 379.85$ MPa, 标准差为 $\sigma_s = 19.389 8$, 服从正态分布 $S \sim N(\bar{\mu}_s, \sigma_s^2) = N(379.85, 19.389 8^2)$ ^[19]。

通过施加静应力对零件进行有限元分析, 单发阻铁和击锤的有限元分析结果如图 8 所示。由分析结果可知, 单发阻铁所受的最大应力 $\bar{\mu}_1 = 285.3$ MPa, 击锤所受的最大应力 $\bar{\mu}_2 = 282.4$ MPa, 取变异系数为 0.07, 求得标准差为 $\sigma_1 = 19.971$, $\sigma_2 = 19.768$ 。

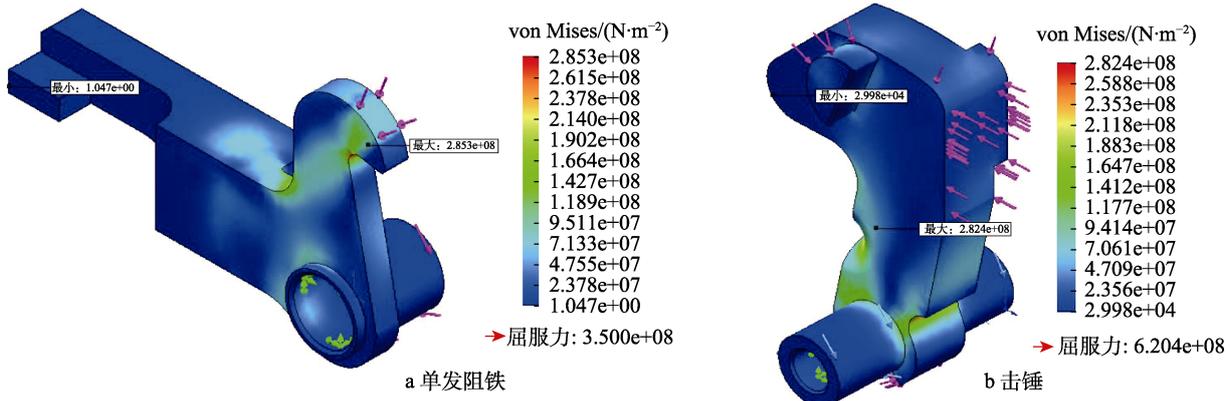


图 8 应力分析结果
Fig.8 Force analysis: a) semi-automatic sear; b) hammer

设机构的功能函数为:

$$y = S - L \tag{2}$$

式中: S 为材料强度; L 为零部件受到的极限应力, 均服从正态分布。

$$\begin{aligned} S &\sim N(\bar{\mu}_s, \sigma_s^2) = N(379.85, 19.3898^2) \\ L_1 &\sim N(\bar{\mu}_1, \sigma_1^2) = N(285.3, 19.971^2) \\ L_2 &\sim N(\bar{\mu}_2, \sigma_2^2) = N(282.4, 19.768^2) \end{aligned} \tag{3}$$

因此, y 也服从正态分布:

$$y \sim N(\mu_y, \sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_L^2}) \tag{4}$$

可靠度即 y 大于 0 的概率:

$$R = \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} e^{-\frac{(x-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}} dx = \Phi\left(\frac{\mu_S - \mu_L}{\sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_L^2}}\right) = \Phi(\beta) \tag{5}$$

式中: β 称为可靠度系数。

通过代入计算式 (5), 求得可靠度系数分别为 $\beta_1 = 3.397$, $\beta_2 = 3.519$ 。查阅正态分布概率表得到可靠度 $R_1 = 0.999 52$, $R_2 = 0.999 55$ 。因此, 最终的发射机构的可靠度为 $R = R_1 \times R_2 \times 100\% = 99.907\%$ 。由此可见, 发射机构的基础可靠性是非常高的, 因此导致发射机构出现超越保险异常击发故障的主要原因是机构零件位置错误, 这与 FMECA 分析结果一致。

3 超越保险异常击发故障分析

由发射机构的 FMECA 分析得出, 超越保险异常击发是一种危害性非常大的发射机构故障, 它能够在某自动步枪处于保险位置“0”时自动击发。在 2004 年 5 月, 发生了一起因射手的错误操作, 导致发射机构超越保险异常击发而造成走火伤人事故。虽然射手的错误操作是导致发射机构故障的直接原因, 但是这也说明了某自动步枪发射机构的设计本身就存在相

应的隐患^[20]。由于超越保险异常击发故障的危害程度非常高, 在 GJB 3484《枪械性能实验方法》的保险机构安全性实验中有明确规定, “枪械需呈待击发状态, 置发射转换器于保险位置, 进行 10 次试图超越保险的空膛击发”。在事故发生之前, 用实验的方式及时发现故障并解决。

3.1 超越保险异常击发故障原理

在单连发发射机构中, “0”位置为保险, “1”位置为单发状态, “2”位置为连发状态。超越保险异常击发是在扣住扳机不放的同时, 将保险从“2”连发状态调整到“0”保险状态。在连发状态下, 单发阻铁被快慢机(保险)压住, 无法扣住被枪机框后坐压下的击锤, 而保险又会将扳机卡在击发位置, 从而将会一直保持在连发状态, 其机构位置如图 9 所示^[21]。此时从外观上看, 某自动步枪处于安全的保险状态, 然而只要拉动自动机, 某自动步枪就会自动击发, 并将以连发状态打空弹夹。保险机构未能起到限制作用, 此时发射机构任务不可靠。

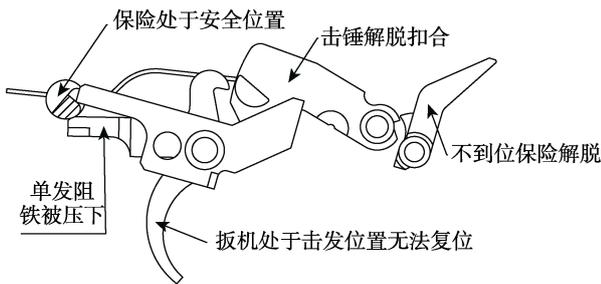


图 9 超越保险异常击发
Fig.9 Exceedance insurance abnormal firing

超越保险的故障只有在以“021”顺序调整保险时, 会出现超越保险异常击发, 而“012”顺序调整保险时, 是不会出现超越保险故障的。其原理是, 扣住扳机, 将保险从“1”位置调整到“0”位置时, 保险会将

同时抬起扳机与单发阻铁, 此时击锤与单发阻铁扣合, 避免了超越保险异常击发故障的发生。若从“1”位置调整到“0”位置, 要先经过“2”位置, 保险会先抬起单发阻铁, 而此时枪机框后坐, 在压下击锤时, 同时会将保险重新压回“1”位置。发射机构将保持单发状态不变, 避免了超越保险异常击发故障发生。

3.2 超越保险异常击发故障的改进方法

解决超越保险异常击发的方法有多种, 从使用角度, 可以改进单发阻铁或者扳机的结构, 使射手在扣动扳机的同时无法同时转动保险机构^[22]; 也可以从原理的角度, 将保险机构调整顺序从“021”改为“012”。改进单发阻铁的方式较为简单, 在单发阻铁或者扳机的后方添加限制凸台即可完成在扣动扳机时无法转动保险的任务, 如图 10 所示。

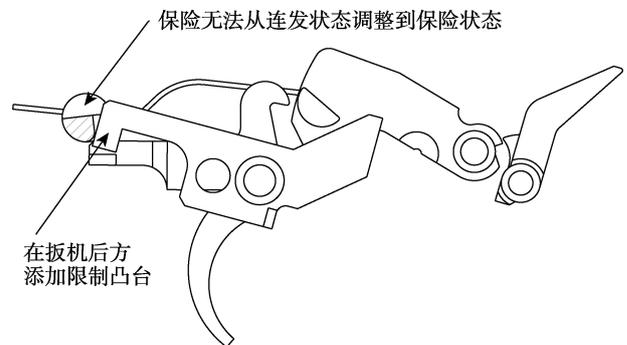


图 10 限制凸台
Fig.10 Lug boss

从原理的角度去解决超越保险异常击发的问题, 可以改进保险装置, 将某自动步枪的保险机构调整顺序从“021”改为“012”。单连发发射机构各状态如图 11 所示。虽然改进保险能够从根本上解决超越保险异常击发的问题, 但是此改进将会导致发射机构切换状态需要调整的保险角度大幅增加。

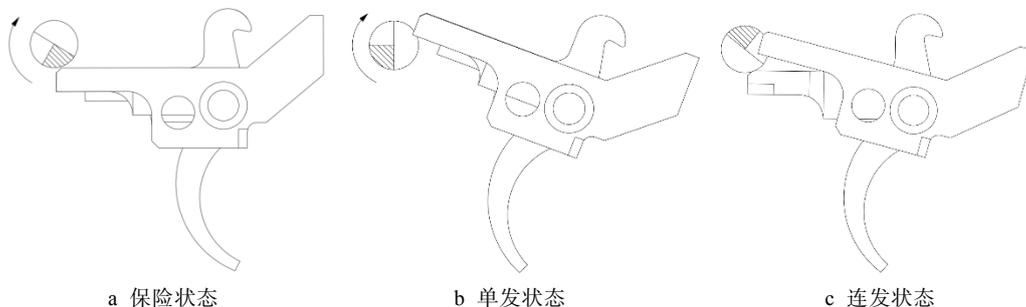


图 11 不同状态的发射机构
Fig.11 Launching mechanism in different states: a) safety condition; b) semi-automatic firing condition; c) automatic firing condition

4 结论

1) 在故障模式、影响及危害性分析中, 由综合

评分法得出, 发射机构中危害程度最大的故障为超越保险异常击发。

2) 通过动力学建模与仿真, 由应力-强度干涉理

论计算得出,发射机构的基础可靠性高达 99.907%,非常可靠,与 FMECA 所分析的结果一致。

3) 可以通过改进扳机或者改进保险的方式从不同的角度解决超越保险异常击发的问题,无论使用何种方法,都能够在射手错误操作时起到保护作用,使得发射机构的任务可靠性得到提升。

参考文献:

- [1] GJB 451A—2005, 可靠性维修性保障性术语[S].
GJB 451A—2005, Glossary of Reliability and Maintainability Assurance[S].
- [2] 张龙,王昌明.水下枪发射机构的运动与动力特性研究[J].南京理工大学学报(自然科学版),2004,28(6):575-579.
ZHANG Long, WANG Chang-ming. Kinematic and Dynamic Performances of Underwater Pistol[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2004, 28(6): 575-579.
- [3] CHASE K W, GAO JINSONG, MAGLEBY S P. General 2-D Tolerance Analysis of Mechanical Assemblies with Small Kinematic Adjustments[J]. Journal of Design and Manufacturing, 1995, 5(4): 263-274.
- [4] 陈启轩.基于 FMECA 与 FTA 的液力变矩器可靠性分析[D].大连:大连交通大学,2019.
CHEN Qi-xuan. Reliability Analysis of Hydraulic Torque Converter Based on FMECA and FTA[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2019.
- [5] 李彤,贾庆轩,陈钢,等.面向轨迹跟踪任务的机器人运动可靠性评估[J].系统工程与电子技术,2014,36(12):2556-2561.
LI Tong, JIA Qing-xuan, CHEN Gang, et al. Motion Reliability Assessment of Robot for Trajectory Tracking Task[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(12): 2556-2561.
- [6] 师忠秀,张凤生,徐志良.多臂机构动作可靠性分析及计算方法[J].青岛大学学报(工程技术版),1998,13(1):7-12.
SHI Zhong-xiu, ZHANG Feng-sheng, XU Zhi-liang. Analysis Method for Multiple Arm Mechanism Action Reliability[J]. Journal of Qingdao University Engineering & Technology Edition, 1998, 13(1): 7-12.
- [7] 冯元生.机构可靠性理论的研究[J].中国机械工程,1992,3(3):1-3.
FENG Yuan-sheng. Research on the Theory of Institutional Reliability [J]. China Mechanical Engineering, 1992, 3(3): 1-3.
- [8] 冯元生.机构磨损可靠性[J].航空学报,1993,14(12):642-644.
FENG Yuan-sheng. Wear Reliability of Mechanism[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1993, 14(12): 642-644.
- [9] 冯元生,冯蕴雯,吕震宙.机构磨损可靠性分析方法研究[J].质量与可靠性,1999(3):24-27.
FENG Yuan-sheng, FENG Yun-wen, LYU Zhen-zhou. Mechanism Wear Reliability Analysis Method[J]. Quality and Reliability, 1999(3): 24-27.
- [10] 张丽平.自动武器发射机构运动可靠性分析与设计研究[D].南京:南京理工大学,2016.
ZHANG Li-ping. Research on Motion Reliability Analysis and Design of Automatic Weapon Launching Mechanism[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [11] GJB 450A—2004, 装备可靠性工作通用要求[S].
GJB 450a—2004, General Requirements for Materiel Reliability Program[S].
- [12] 易声耀,张竞.自动武器原理与构造学[M].北京:国防工业出版社,2009:206-231.
YI Sheng-yao, ZHANG Jing. Principle and Tectonics of Automatic Weapons[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 206-231.
- [13] 曹炜.某自动步枪典型故障可靠性分析及研究[D].南京:南京理工大学,2018.
CAO Wei. Analysis and Research on the Reliability of Typical Faults of an Automatic Rifle[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [14] 陈卫东,冉臣龙,郑启辉,等.基于 FFMECA 的任务可靠性综合评价方法[J].北京航空航天大学学报,2016,42(9):1819-1826.
CHEN Wei-dong, RAN Chen-long, ZHENG Qi-hui, et al. Comprehensive Assessment Method of Mission Reliability Based on FFMECA[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(9): 1819-1826.
- [15] 黄祥瑞.可靠性工程[M].北京:清华大学出版社,1990.
HUANG Xiang-rui. Reliability Engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1990.
- [16] 赵宇,杨军,马小兵.可靠性数据分析教程[M].北京:北京航空航天大学出版社,2009.
ZHAO Yu, YANG Jun, MA Xiao-bing. Reliability Data Analysis Tutorial[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2009.
- [17] 刘钦文,赵品伦.基于蒙特卡罗的系统任务可靠性分析方法[J].电子产品可靠性与环境试验,2013,31(5):17-22.
LIU Qin-wen, ZHAO Pin-lun. An Analysis Method of System Mission Reliability Based on Monte Carlo Method[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2013, 31(5): 17-22.
- [18] 石佩斐.基于蒙特卡罗法的螺旋锥齿轮疲劳强度的可靠性分析[D].洛阳:河南科技大学,2014.
SHI Pei-fei. Fatigue Strength Reliability Analysis of Spi-

- ral Bevel Gear Base on Monte Carlo Method[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2014.
- [19] 朱宇驰. 装载机动臂液压缸可靠性研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
- ZHU Yu-chi. Research on Reliability of Loader Boom Cylinder[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2015.
- [20] 朵英贤, 马春茂. 中国自动武器[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 34-41.
- DUO Ying-xian, MA Chun-mao. China's Automatic Weapons[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 34-41.
- [21] 余家武, 刘兵. 国产某小口径步枪发射机构改进[J]. 四川兵工学报, 2001, 22(2): 35-37.
- YU Jia-wu, LIU Bing. Improvement of the Firing Mechanism of a Small-Caliber Rifle in China[J]. Sichuan Journal of Ordnance Engineering, 2001, 22(2): 35-37.
- [22] 李清. 某型步枪发射机构安全性研究[J]. 四川兵工学报, 2005, 26(3): 40-41.
- LI Qing. The Safety Analysis of the Firing Mechanism of a Type of Rifle[J]. Sichuan Ordnance Journal, 2005, 26(3): 40-41.

责任编辑: 刘世忠