

文章编号:1006-9941(2024)11-1194-12

枪械击发点火系统的点火可靠性仿真分析

张树霞¹,李一蕊²,魏志芳¹,王志军¹,张克斌¹,朱亚辉¹

(1.中北大学机电工程学院,山西太原030000;2.中国兵器工业第二〇八研究所,北京102202)

摘要: 为了提高枪械击发点火系统的点火可靠性,研究以一种小口径步枪击发点火系统为研究对象,设计系统模拟试验装置,开展了系统点火性能和可靠性试验研究。在此基础上,采用拉格朗日-欧拉流固耦合方法(ALE)建立了击发点火系统的点火模型,并搭建了参数化仿真平台,以压力启动时间为点火输出性能表征参数,建立了枪械击发点火系统的点火可靠性分析模型。通过将模型计算结果与试验数据进行对比验证,并模拟研究了击发点火系统结构和装配参数变化影响下的可靠性。结果表明:枪械击发点火可靠性分析模型计算结果与试验结果误差为0.72%,模型具有较好的准确性;各因素均值变化对系统可靠性的影响规律为:击针突出量>闭锁间隙>火台头部直径>底火壳厚度>底火装入深度>击针头部直径;标准差变化对系统可靠性影响较小。这些研究结果可为枪械击发点火系统的可靠性设计提供参考。

关键词: 枪械击发点火系统;点火性能;代理模型;可靠性仿真

中图分类号: Tj5;Tj20

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2024147

0 引言

枪械击发点火系统由枪械击发机构、底火、枪弹弹壳等组成,实战中其经常受到设计制造工艺和作战环境等多种因素的影响,导致可能出现不发火、早发火、底火击穿等故障问题^[1-2]。轻则影响枪械性能,重则威胁作战人员的生命安全。因此,研究枪械击发点火系统的可靠性至关重要。然而,在研制过程中,由于缺乏有效的可靠性设计理论和验证方法,通常只能依赖传统的“画、加、打”的研发模式。这种试错法虽然能针对性地解决已知问题,却难以根本解决新装备的使用可靠性问题^[2-3]。

为了提高枪械工作的可靠性,学者们在枪械火工品、发射机构、自动机等部组件的可靠性研究方面开展了大量工作。高滨等^[4]通过功能裕度设计法对火工品进行可靠性优化设计,显著提高了击发点火系统的可

靠性。伊泉剑等^[5]考虑火工品外界刺激量具有随机性的特点,提出了基于应力-强度干涉模型的火工品可靠性设计方法,结果表明采用该方法的设计结果能同时满足发火可靠性指标和安全可靠性指标。张天飞等^[6]利用 Monte Carlo 技术对升降法试验进行了模拟,为利用升降法数据进行火工品可靠性评定打下了基础。李定哲等^[7]利用 FMECA 的方法对自动武器发射机构进行危害程度分析,通过改进零部件提高了发射机构的可靠度。赵聪聪等^[8]基于枪械击发点火系统各部件的装配关系设计了一种落锤试验装置,实现了对击发点火系统的输出性能进行定量测试。在此基础上,李哲通过分析枪械击发点火系统的工作原理并结合相关试验数据,建立了系统典型故障的故障树,获得了致使击发点火故障发生的主要因素,揭示了其故障机理^[2],为击发点火系统的可靠性研究奠定了基础。

为了定量分析各部件结构、材料参数等对可靠性的影响,学者们通过试验分析、数值模拟等方法开展了大量研究。张文平等^[9]通过试验分析,提出了提高底火壳硬度,降低火台硬度的改进措施,解决了某底火击穿漏烟问题。袁克斌^[10]等对高温和扬尘下的机枪典型机构的动作可靠性进行了研究,分析了导致故障发生的主要影响参数并做出改进设计。张贺^[11]等设计

收稿日期:2024-06-06;修回日期:2024-07-04

网络出版日期:2024-08-22

基金项目:国家自然科学基金(62003314)

作者简介:张树霞(1980-),女,讲师,主要从事武器系统设计研究。e-mail:zhang_shuxia@nuc.edu.cn

通信联系人:张树霞(1980-),女,讲师,主要从事武器系统设计研究。e-mail:zhang_shuxia@nuc.edu.cn

引用本文:张树霞,李一蕊,魏志芳,等.枪械击发点火系统的点火可靠性仿真分析[J].含能材料,2024,32(11):1194-1205.

ZHANG Shu-xia, LI Yi-ru, WEI Zhi-fang, et al. Simulation Analysis of Ignition Reliability of Firearm Firing-ignition Systems[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2024, 32(11):1194-1205.

并实施了盐雾环境寿命试验对自动机运动参数进行了细致测量,对盐雾环境下某自动步枪自动机运动特性和故障进行了分析。冯文浩等^[12]对不同工况条件下的通用机枪抽壳故障进行了仿真建模分析,分析了拉壳钩脱落的原因,选取拉壳钩的典型设计参数为分析对象,对拉壳钩进行了改进设计。

上述研究主要集中在枪械部件的可靠性分析方法和优化设计,而对于枪械的击发点火系统可靠性研究较为不足,且缺乏对各部件结构和装配参数等方面的系统深入研究,未重视击针/底火/弹壳等零部件尺寸、装配关系等不确定性对枪械击发点火可靠性的影响。枪械击发点火系统是枪械完成射击功能的关键环节,为了提高其点火可靠性,非常有必要建立系统的可靠性分析模型,研究各部件结构参数、装配参数等对系统点火可靠性的影响规律。

为此,本研究以一种小口径步枪击发点火系统为研究对象,设计系统模拟试验装置,开展系统点火性能和可靠性试验研究,分析击发点火系统的可靠性影响因素。在此基础上,采用拉格朗日-欧拉流固耦合方法

(ALE)建立击发点火系统的点火模型。以压力启动时间为点火输出性能的代表参数,建立枪械击发点火系统的点火可靠性代理模型,并分析各因素均值和标准差对点火系统可靠性的影响规律,为改进枪械结构,提高枪械可靠性提供参考。

1 枪械击发点火试验

1.1 枪械击发点火系统

枪械击发点火系统是指枪械完成击针撞击底火、点燃底火击发药,击发药点火、传火过程的部组件的统称,由枪机、击锤簧、击锤、击针、底火、枪弹弹壳等部件组成,依据文献^[13],研究绘制其工作过程如图1所示。枪械完成闭锁后封闭弹膛,提供了击针、底火、弹壳的初始装配关系,扣动扳机后,击锤阻铁释放击锤,在击锤簧压缩能量释放的作用下,击锤获得了向前运动的能量,并撞击击针,击针撞击底火,底火壳向内变形与火台挤压击发药,击发药形成热点,当热点达到点火温度时点火产生火焰,火焰通过传火孔进入枪弹弹壳并完成传火过程。

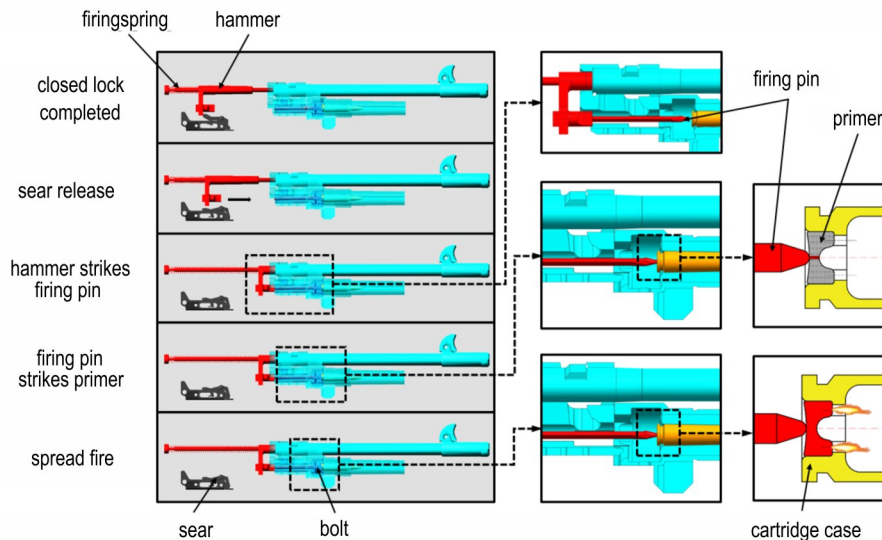


图1 枪械击发点火系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of firearm firing-ignition system

从系统的整体运动过程可以观察到,点火过程主要涉及击锤、击针、底火、枪机和弹壳的机械运动。为了更简化地分析点火性能,研究简化点火系统,忽略击锤簧与击锤的作用过程;简化枪击的主要结构;并将击锤简化为一定速度的落锤,将弹壳简化为长10 mm的截断弹壳以便于研究击发药的点火、传火情况,得到了如图2所示的结构。

从图2可以看出,影响点火性能的主要参数为:底

火装入深度(PLD)、底火壳底厚(PT)、击针突出量(LO)、击针头部直径(IHD)、火台头部直径(AHD)、闭锁间隙(LG)和击针撞击速度 v 。

1.2 试验装置

为研究枪械击发点火系统的击发点火性能及可靠性,研究基于枪械击发点火模拟系统(图2)设计了图3所示的试验装置^[12-15]。该试验装置主要由落锤工作台、测试工装、电荷放大器、多通道数据采集仪、加速度

传感器、压力传感器等组成。其中,测试工装包括模拟枪机、压螺及传感器安装模块,用于安装和固定压力传感器、击针及带底火的截断弹壳,能够模拟小口径步枪击发点火系统的真实装配关系。图4为试验中采用的击针和带底火的截断弹壳。

试验时,可通过调节落锤高度使击针以不同速度撞击底火,底火发火产生的气体压力信号通过压力传感器测得。压力传感器型号为Y1001T,采集频率500 KHz,量程0~20 MPa,由扬州熙源电子科技有限公司生产。

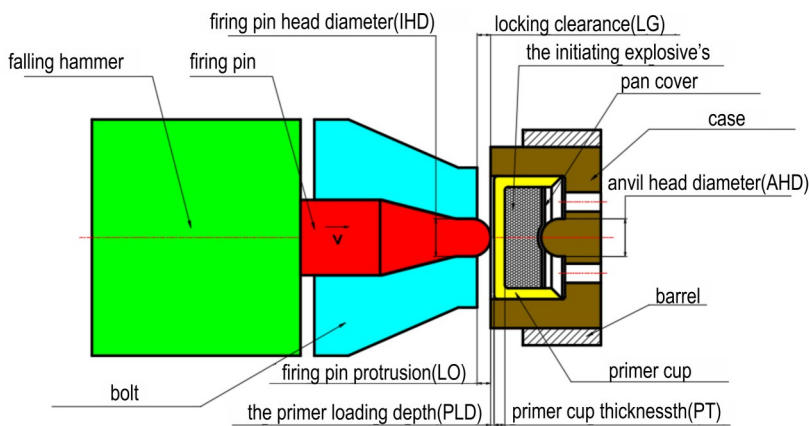


图2 枪械击发点火模拟系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of firearm firing-ignition simulation system

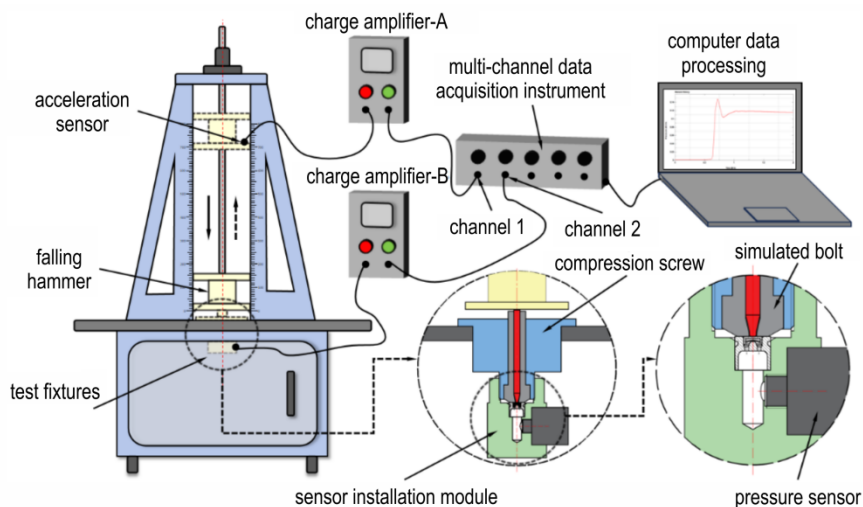


图3 击发点火模拟试验装置

Fig.3 Firing-ignition simulation test device



a. firing pin test piece



b. cut off the bottom of the shell test piece

图4 试验对象

Fig.4 Test subject

1.3 试验方法

为测试枪械击发点火系统的点火性能和点火可靠性,研究通过图3的试验装置对击发点火系统进行了点火试验研究。通过单发试验测试系统的点火输出性能,通过200发小样本击发点火试验测试系统的点火可靠性。为了获得击发点火系统底火装入深度(PLD)、底火壳底厚(PT)、击针突出量(LO)、击针头部直径(IHD)、火台头部直径(AHD)、闭锁间隙(LG)的具体尺寸参数,研究在试验前对系统各部件进行了测量计算,得到了击针、底火壳等部件参数的均值和标准差,如表1和表2所示。表1~2中的数据可为后续仿真建模提供部件结构和装配尺寸输入参数。

表1 击发点火性能试验参数

Table 1 Test parameters of firing-ignition performance mm

research factors	LG	PT	AHD	IHD	LO	PLD
size	0.1	0.71	2.2	2	1.2	0.14

Note: LG is locking clearance. PT is primer cup thickness. AHD is anvil head diameter. IHD is firing pin head diameter. LO is firing pin protrusion. PLD is the primer loading depth.

表2 击发点火可靠性试验参数

Table 2 Reliability test parameters of firing-ignition mm

research factors	LG	PT	AHD	IHD	LO	PLD
averages	0.1	0.71	2.2	2	1.2	0.07
standard deviation	0.065	0.0083	0.0667	0.0167	0.0217	0.0133

研究的点火测试过程如下:在室温(25℃)下,选取质量为250g的落锤,并将其高度调整至160mm。将完成测量的击针和带底火截断弹壳放入测试工装中,并安装压力传感器。根据图3所示放置测试工装,并连接相关线路。释放落锤以撞击击针,激发底火。试验完成后,提取传感器测试曲线,通过数据处理获得压力启动时间、峰值到达时间、压力峰值等压力特征参数^[16-17]。其中,压力启动时间定义为击发点火系统输出气体压力响应过程中,弹壳内压力连续上升达到5%压力峰值对应的时间。

2 击发点火模型的建立与验证

2.1 击发点火模型的建立

击发点火试验是唯象的定性试验,成本较高,危险性较大。因此,研究通过LS-DYNA对枪械击发点火系统的点火过程进行模拟研究,分析击发点火系统部件关键结构尺寸和装配尺寸等对击发点火性能的影响^[18-20]。

由于击发点火系统的击发点火过程是一个复杂的力/热/化学耦合过程,为了简化模型和计算,本研究做出如下简化假设:

- ①击锤撞击击针的能量主要来源于击锤簧,使得击锤以特定的质量和速度撞击击针,本研究简化击锤簧等部件,将击锤等效为一定质量和速度的落锤;
- ②闭锁后,枪机与弹壳之间几乎不存在相对运动,本研究忽略枪机与弹壳之间的相对运动;
- ③各部件的初始应力和重力的影响较小,可忽略不计;
- ④为方便有限元建模,忽略部分部件与系统工作无关的倒角、圆角;
- ⑤击发药为均质炸药,忽略试验温度变化对击发药点火性能的影响。

击发点火系统的点火过程涉及气体、固体两类物质属性,综合考虑计算效率,研究基于LS-DYNA软件采用Lagrange和多物质ALE算法相结合的方法开展击发点火性能仿真研究^[21]。其中,落锤、击针、枪击、底火壳和弹壳等部件采用Lagrange算法^[21]进行离散,涉及气体扩散模型的击发药处理方式则采用多物质ALE法。图5所示为击发点火系统的有限元模型,部件结构尺寸和装配尺寸与表1中设置一致。通过网格收敛性计算,本研究将网格最小尺寸确定为0.03mm。

如图5所示,落锤的初始速度 v ,为防止弹壳发生横向运动在其侧面施加位移约束。针对流固耦合算法进行接触算法设置:

- 1)底火壳与击针之间定义侵蚀接触,并设置两者之间的静摩擦系数0.10,动态摩擦系数0.01;
- 2)在击针撞击底火壳时,弹壳-盖片的侵蚀接触,采用静摩擦系数0.3,动态摩擦系数0.2;
- 3)底火壳、击发药剂及纸盖片设为一个PART集,各PART之间设置自动单面侵蚀接触;
- 4)在空气域外侧施加无反射边界条件,并在模型密闭室内设置测压点(坐标位置与试验一致),测量击发药气体压力变化^[21]。

2.2 材料模型及计算参数

计算模型涉及金属和击发药剂两类材料,其中,底火壳、弹壳发生较大变形,击针也受到较大作用力,本研究中采用Johnson-Cook本构模型^[21]描述底火壳、击针与弹壳的变形。击针套、落锤与盖片采用PLASTIC_KINEMATIC模型;击发药采用ELASTIC_PLASTIC_HYDRO模型,各部件材料模型参数如表3~6所示^[21]。

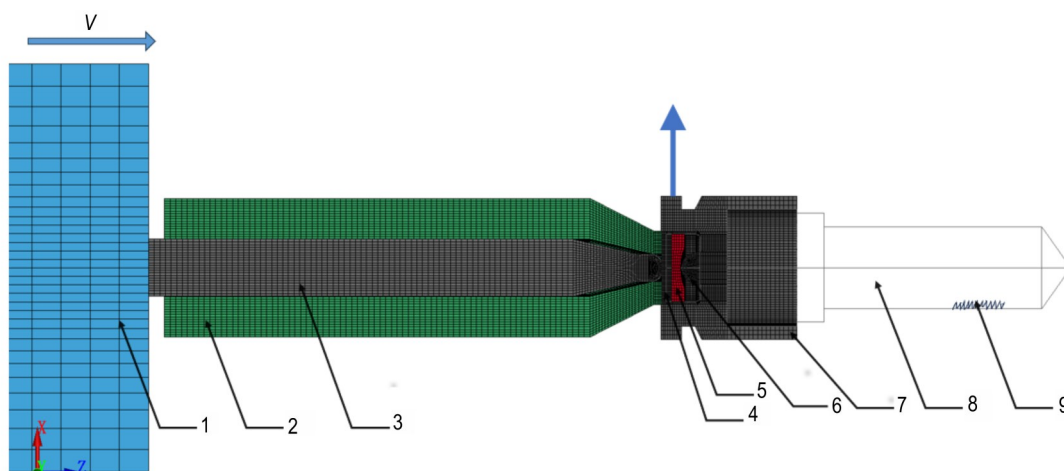


图5 击发点火系统有限元模型

1—落锤, 2—枪机, 3—击针, 4—底火壳, 5—击发药, 6—纸盖片, 7—弹壳, 8—测压工装密闭室(空气域), 9—压力监测点(压力传感器安装位置)

Fig.5 Finite element model of the firing-ignition system

1—hammer, 2—bolt, 3—firing pin, 4—primer cup, 5—primer percussion powder, 6—pan cover, 7—cartridge case, 8—pressure test fixture sealed chamber (air domain), 9—pressure monitoring point (pressure sensor installation position)

表3 底火壳、击针与弹壳的 Johnson-Cook 模型参数^[21]

Table 3 Johnson-Cook model parameters of primer cup, firing pin, and cartridge case^[21]

components	material	density / g·cm ⁻³	elastic modulus / MPa	shear modulus / MPa	poisson's ratio	yield strength / MPa
firing pin	25Cr2Ni4WA	7.85	207	80	0.28	1500
cartridge case	S20A	7.85	207	80	0.30	400
primer cup	H68	8.93	110	40	0.32	190

components	strain hardening modulus / MPa	strain hardening factor	strain rate coefficient	coefficient of thermal softening	reference temperature / K	quasi-static critical strain rate
firing pin	1770	0.12	0.016	1.25	293	1.0
cartridge case	600	0.26	0.014	1.03	293	1.0
primer cup	207	0.365	0.0376	1.09	293	1.0

表4 底火壳、击针与弹壳的 Mie-Gruneisen 状态方程参数^[21]

Table 4 Mie-Gruneisen equation of state parameters for primer cup, firing pin, and cartridge case^[21]

material	c / m·s ⁻¹	s	γ ₀
firing pin(25Cr2Ni4WA)	4569	1.49	2.07
cartridge case(S20A)	4569	1.49	2.17
primer cup(TH68)	3940	1.92	1.99

Note: c is wave velocity, s and γ₀ are constant coefficient.

表5 枪机、落锤等材料参数^[21]

Table 5 Parameters of bolt, hammer, etc^[21]

components	density / g·cm ⁻³	elastic modulus / MPa	poisson's ratio	yield stress / MPa	hardening parameters
bolt, hammer	7.80	2.10×10 ⁵	0.30	1000	1.0
pan cover	1.2	0.6×10 ⁵	0.33	50	0.0

表6 击发药剂基本参数^[21]

Table 6 Basic parameters of the primer percussion powder^[21]

density / g·cm ⁻³	shear modulus / MPa	yield stress / MPa	modulus of hardening	pressure shut-off valve parameters	failure to change
2.61	3.36×10 ³	146	0	-9	1.5

为研究击发药在击针撞击、底火壳变形等的冲击能量下发生点火反应,采用 LeeTarver 模型^[21]描述击发药在机械撞击作用下的力-热-化学响应,其模型参数如表 7 所示。

2.3 击发点火模型的验证

为了验证击发点火模型计算的准确性,研究采用 LS-DYNA 对枪械击发点火系统的点火过程进行了数值模拟,得到系统的压力响应曲线,并与试验压力传感

表 7 模型状态方程参数

Table 7 Parameters of the state equation model

parameter	numeric value	parameter	numeric value
A / Pa	609.77	B_1 / Pa	66.7
B / Pa	12.95	g	0.667
X_{p1}	4.2	I / s^{-1}	4×10^9
X_{p2}	1.1	G_1	800
W	0.25	G_2	660
R_1	778	$C_{vp} / \text{Pa} \cdot \text{K}^{-1}$	1.0×10^{-3}
R_2	-0.0503	$C_{vr} / \text{Pa} \cdot \text{K}^{-1}$	2.78×10^{-3}
R_3	2.223×10^{-5}	$FMXIG$	0.3
R_5	11.3	$FMXGR$	0.7
R_6	1.13	$FMNGR$	0.02
A_1 / Pa	0.00		

Note: $A, B, X_{p1}, X_{p2}, W, R_1, R_2, R_3, R_5$ and R_6 are the constant of the reaction products. A_1 and B_1 are the constant of the unreacted products; g is the geometric parameter related to the growth of hotspots; I is the ignition control parameter. G_1 and G_2 are control parameters for explosive reaction. C_{vp} is the heat capacity of reaction products. C_{vr} is the Heat capacity of unreacted explosive. $FMXIG$ is the maximum F for ignition term. $FMXGR$ is the maximum F for growth term. $FMNGR$ is the maximum F for completion term.

器记录的压力响应曲线进行了对比,数值计算与试验压力传感器记录的压力响应曲线对比结果如图 6 所示。由图 6 可以看出仿真模型计算结果较试验相比压力启动时间快 3.46%,压力峰值时间慢 1.25%,压力峰值小 5.48%,两者增长趋势基本一致。仿真研究中忽略了击发药的不均匀性以及试验温度变化对击发药的影响,导致与试验结果产生的误差。因此,研究建立的数值模型可以较为准确的模拟枪械击发点火系统的点火情况。

采用 LS-DYNA 对枪械击发点火系统的点火过程进行模拟,得到了击发点火响应过程中的火焰传播情

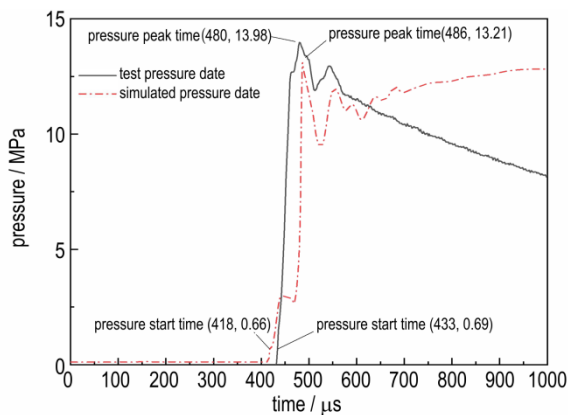


图 6 仿真与试验压力响应曲线对比

Fig. 6 Comparison of simulation and experimental pressure response curves

况,如图 7 所示。 $0 \mu\text{s}$ 为击针和落锤刚接触时刻,与试验起始时刻一致。从图 7 可以看出,在 $0 \sim 200 \mu\text{s}$,落锤推动击针撞击底火壳,底火壳发生变形,引起了击发药的点火、传火;在 $200 \sim 400 \mu\text{s}$,击发药燃烧产生的气体产物经传火孔不断向空气域传播,在 $400 \mu\text{s}$ 左右运动到压力检测点处; $600 \mu\text{s}$ 燃烧产物充满弹壳及测压工装密闭室。这与图 6 中的压力响应曲线变化一致,可见研究建立的数值模型具有较好的准确性,可为枪械击发点火系统的点火作用机制分析和可靠性研究奠定基础。

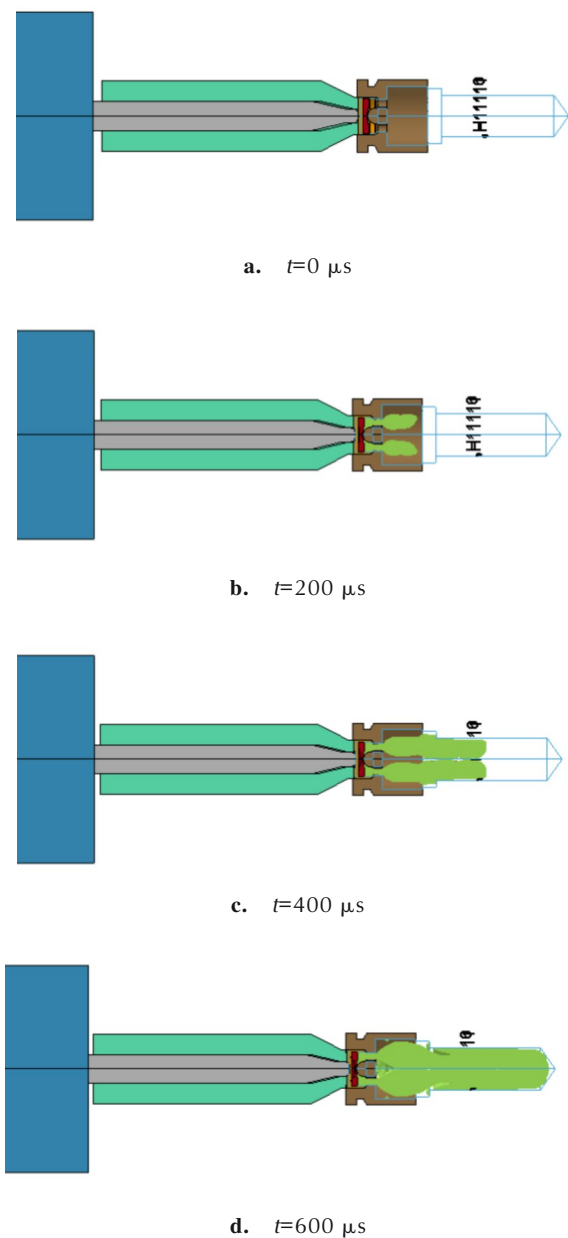


图 7 击发点火响应过程

Fig. 7 Response process of firing-ignition

目前,通常采用击发点火系统点火过程中的输出压力、温度、声音、火焰形态等特征量来表征系统的输出性能。其中,压力测试最为成熟,测试结果精度高,能够较好的反映底火输出性能。底火输出压力响应主要特征量有压力启动时间、压力峰值时间、压力峰值。研究发现压力峰值主要与击发药量有关,不能较好的反映击发点火系统的点火情况,而压力峰值时间与压力启动时间与击发点火系统的装配参数和结构参数等有较好的相关性,压力启动时间相比峰值到达时间能够直接反映击发点火系统的启动速度,更合理地判断击发点火系统的质量和可靠性^[31]。因此,在后续可靠性研究中采用压力启动时间作为击发点火系统性能表征参数。

3 点火系统的可靠性模拟研究

3.1 击发点火参数化数值模拟

可靠性仿真需要较多的数据样本,为了提高计算效率,本研究在前文点火性能数值模型基础上,通过ISIGHT软件^[2]构建枪械击发点火性能参数化仿真平台,具体仿真流程如图8所示。

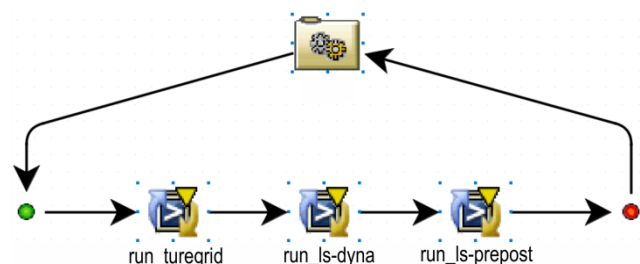


图8 枪械击发点火性能参数化分析流程

Fig.8 Parameterized analysis process of firearm firing-ignition performance

利用网格划分软件TrueGrid,在建立网格模型的.tg命令流文件中,利用PARAMETER声明给尽可能多的参数赋值,以达到控制几何体和网格的各个尺寸的目的,实现枪械击发点火仿真模型结构尺寸的参数化;通过编制用于后台调用网格划分软件TrueGrid和有限元软件LS-DYNA的.bat批处理文件,直接在电脑终端进行仿真计算或网格变形;基于LS-Prepost的脚本语言实现批处理LS-DYNA的数值计算仿真结果。

针对表2中可靠性试验各部件结构尺寸和装配尺寸取值范围,本研究采用最优拉丁超立方试验设计方法抽样生成随机样本点^[22],得到试验设计样本点空间如表8所示。根据表8中各个工况的具体参数,循环

表8 枪械击发点火性能仿真样本数据库

Table 8 Database of firearm firing-ignition performance simulation sample

research factors	LG / mm	PT / mm	AHD / mm	IHD / mm	LO / mm	PLD / mm
1	0.0933	0.7043	2.2671	1.9722	1.2635	0.1416
2	0.0587	0.6922	2.1582	1.9899	1.2553	0.093
3	-0.005	0.6713	2.1	1.9405	1.2010	0.1163
4	0.1032	0.6758	2.143	1.9962	1.2257	0.1133
5	0.0735	0.6669	2.2823	1.9025	1.2323	0.1224
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
200	0.2315	0.66	2.1513	1.9557	1.1582	0.1406

调用枪械击发点火性能参数化仿真平台获得所需的计算结果。

3.2 点火系统的可靠性代理模型的建立

为了快速得到不同因素对击发点火系统影响的可靠性计算结果,采用代理模型方法对参数化仿真结果进行拟合,分析击发点火系统各影响因素对其输出性能的影响,研究系统的可靠度^[23]。目前开展可靠性研究常用的代理模型方法有RBF(Radial Basis Function)模型^[24]、EBF(Ellipsoid Basis Function)模型^[25]、Kriging模型^[26]和RSM(Response Surface Model)代理模型^[27]。

其中,RBF模型是一种基于径向基函数的插值或逼近方法,通常用于回归和分类问题。它的基本思路是,通过一些中心点和对应的权重来构造一个非线性函数,这个函数能够较好地拟合原始数据,从而达到最小化误差的目的,数学表达式为:

$$y = f(x) = \sum_{j=1}^q \omega_j \cdot e^{-\frac{|x_j - c_j|}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

式中, y 为点火性能输出参数; ω_j 为第 j 个神经元的权重; c_j 为第 j 个神经元的中心点; σ 为高斯核的宽度,以上均为无量纲参量。

EBF模型是一种基于椭球形基函数的插值或逼近方法。与RBF模型类似,它也是通过一些中心点和对应的权重来构造一个函数,但是这个函数的基函数是椭球形的,所以它可以拟合更加复杂的数据结构。数学表达式为:

$$y = f(x) = \sum_{j=1}^N \alpha_j g_j(X) + \alpha_{N+1} \quad (2)$$

式中, y 为点火性能输出参数; X 为输入变量; N 为隐节点数目; α_j 为隐节点对应的一组输出权值; α_{N+1} 为未知偏差值,以上均为无量纲参量; $g_j(X)$ 为高斯基函数,

其表达式为：

$$g_j(X) = \exp\left[-1/2(X - c_j)^T S_j^{-1}(X - c_j)\right] \quad (3)$$

$$S_j \approx \hat{S}_j = \frac{1}{N_j} \sum (X - c_j)(X - c_j)^T \quad (4)$$

式中, c_j 为隐节点中心值; S_j 为全协方差矩阵, 近似等于样本方差, 以上均为无量纲参量。

Kriging 模型是一种基于空间数据统计的插值或逼近方法^[28], 它的核心思想是根据样本数据的空间关系, 利用协方差函数来描述不同点之间的相关性, 从而预测未知点的属性值。数学表达式为：

$$y = \hat{G}(x) = f^T(x)\beta + z(x) \quad (5)$$

式中, y 为点火性能输出参数; $f(x)$ 为变量影响因素参数 x 的多项式; β 为 $f(x)$ 的回归系数; $z(x)$ 为均值为零、方差为 σ^2 的高斯随机过程, 其协方差为

$$Cov(z(x_i), z(x_j)) = \sigma^2 \prod_{k=1}^n \exp\left[-\theta_k(x_i^k - x_j^k)^2\right] \quad (6)$$

式中, x_i^k, x_j^k 和 θ_k 依次为样本点 x_i, x_j 和相关参数向量 θ 的第 k 个分量; 超参 θ 通常采用最大似然估计优化, 以上均为无量纲参量。

RSM 模型是一种用于建立输入和某些输出之间

关系的多项式模型^[27]。通常在设计实验中使用, 通过对实验数据进行回归分析得到一个多项式方程, 数学表达式为：

$$y = \hat{g}(x) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n b_{ij} x_i x_j$$

$$= a_0 + a^T x + x^T B x \quad (7)$$

式中: y 为点火性能输出参数; x_i 为影响因素参数, 指闭锁间隙等; a_0, a_i, b_{ij} 为待估参数, $a = (a_1, a_2, \dots, a_n)^T$, $B = [b_{ij}] = B^T$, 以上均为无量纲参量。

本研究采用这 4 种代理模型拟合击发点火系统的计算结果, 通过对比不同代理模型的拟合精度 (R^2) 确定可靠性分析采用的代理模型。

3.3 可靠性模型计算结果

通过参数化仿真平台, 研究计算了击发点火系统点火性能的仿真数据, 提取各工况的底火装入深度、底火壳底厚、击针突出量、击针头部直径、火台头部直径、闭锁间隙、击发能量与压力启动时间, 通过 RBF 模型、EBF 模型、Kriging 模型和 RSM 模型进行拟合, 采用 R-Squared 对各代理模型的拟合效果进行对比分析, 结果如图 9 所示。

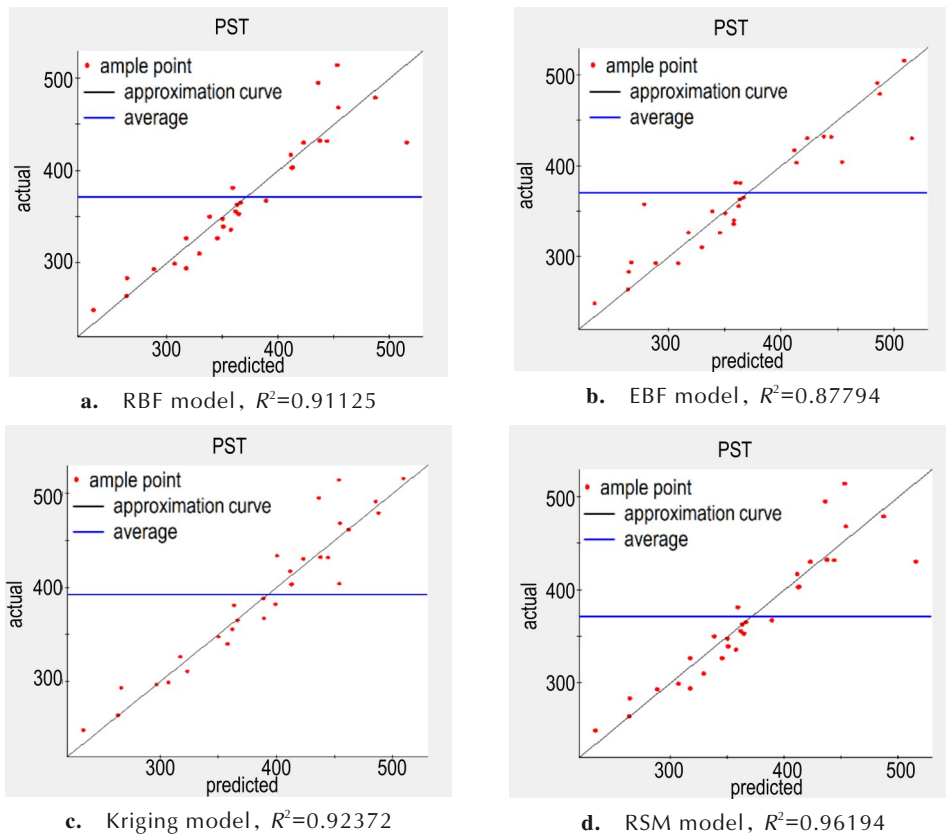


图 9 四种代理模型精度分析示意图

Fig.9 Schematic diagram of accuracy analysis for four agent models

根据 R^2 精度分析计算结果可以看出 RSM 模型可以更好的描述击发点火系统压力启动时间与各影响因素之间关系,为此,研究选取 RSM 模型作为可靠性计算代理模型,如式(8)所示。

$$pst = -7908x_1 - 44.13x_2 - 1612.84x_3 + 3878.64x_4 - 8525.69x_5 + 510.64x_6 - 2127.6x_7 + 200.38x_1^2 + 0.0097x_2^2 + 300.35x_3^2 - 736.23x_4^2 + 7106.75x_5^2 - 38.14x_6^2 + 16627.6x_7^2 + 32.45x_1x_2 + 9778.03 \quad (8)$$

式中, pst 表示压力启动时间、 x_1 表示击针突出量、 x_2 表示击发能量(用落锤高度=160 mm)、 x_3 表示击针头部直径、 x_4 表示火台头部直径、 x_5 表示底火壳底厚、 x_6 表示闭锁间隙、 x_7 表示底火装入深度,以上均为无量纲参量。

3.4 可靠性模型的验证

图 10 所示为击发点火系统可靠性试验压力启动时间记录情况。根据击发点火可靠性试验结果,统计了获取由于工艺误差,载荷误差等引起的压力启动时间正态分布模型参数,计算得到压力启动时间均值为 $362.29 \mu s$, 标准差为 $62.53 \mu s$, 基于 3σ 准则可得出击发点火可靠性分析的可靠性判据约为 $550 \mu s$ 。即压力启动时间大于 $550 \mu s$ 即为发生迟发火、不发火故障。根据可靠性判据统计得出 200 次击发点火可靠性试验中不发火 28 发,迟发火 6 发,计算得到击发点火系统的可靠度为 83%。

结合可靠性判据 $550 \mu s$ 和可靠性代理模型(RSM 模型)计算结果,可确定击发点火系统可靠度计算结果,如表 9 所示。从表 9 中可以看出枪械击发点火可靠性仿真结果与试验结果相比误差较小(0.72%),验证了击发点火可靠性分析模型及方法的可行性和准确性。

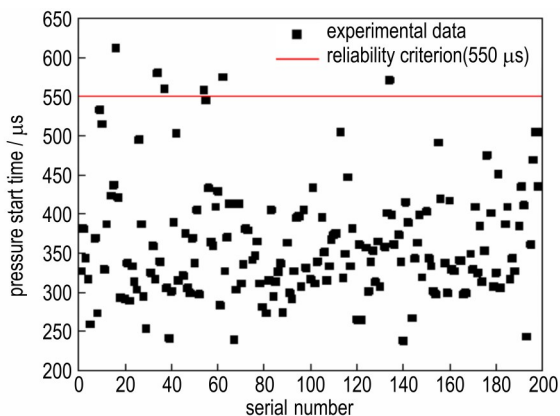


图 10 击发点火可靠性试验数据统计结果图

Fig.10 Statistical results of firing-ignition reliability test data

表 9 枪械击发点火可靠性试验结果与仿真结果对比情况表

Table 9 Comparison of reliability test results and simulation results of firearm firing-ignition

ambient temperature / °C	equivalent firing energy / J	test reliability	model reliability	deviation
25	0.3924	83%	83.6%	0.72%

3.5 基于点火系统可靠性模型的影响因素分析

为研究底火装入深度、击针突出量、闭锁间隙、击针头部直径、底火壳厚度和火台头部直径等因素对枪械击发点火系统点火可靠度的影响规律,研究采用局部灵敏度分析方法开展了各单一因素对击发点火可靠性的影响灵敏度分析^[32],如式(9)所示:

$$Sen\left(\frac{R}{x_i}\right) = \frac{\partial R}{\partial x_i} \approx \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{R(x_i + \Delta x) - R(x_i)}{\Delta x}, i = 1, 2, \dots, 6 \quad (9)$$

式中, R 为枪械击发点火可靠度, x_i 为影响因素,以上均为无量纲参量。

上述 6 种随机变量均遵循正态分布,其模型参数囊括均值与标准差。每个因素分布的均值和标准差的变化都会对击发点火的可靠性产生影响。通过前述建立的枪械击发点火性能的可靠性模型,并结合式(8),研究对单一因素的分布均值和标准差的变动对击发点火可靠性影响的局部灵敏度进行了分析。

其中,各单一因素分布均值变化范围为其原公差范围,标准差在原设计值的基础上增大、减小 1%、5%、10%。计算原始数据为:落锤撞击速度 $v=1.77 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 火台头部直径 $AHD \sim N(2.2, 0.0667^2)$, 底火壳厚度 $PT \sim N(0.71, 0.0083^2)$, 击针头部直径 $IHD \sim N(2, 0.0167^2)$, 底火装入深度 $PLD \sim N(0.07, 0.0133^2)$, 击针突出量 $LO \sim N(1.2, 0.0217^2)$, 闭锁间隙 $LG \sim N(0.1, 0.065^2)$ 。计算结果如表 10 和表 11 所示,各单一因素均值变化对击发点火可靠性影响的 Pareto 图如图 11 所示。

通过对比表 10、表 11 可以看出,各影响因素正态分布的均值变化对枪械击发点火可靠性的影响较大,可靠度 R 绝对值变化范围为:0.0614~0.3459。而其标准差变化在增大、减小 10% 的范围内对可靠度的影响较小,可靠度 R 绝对值变化范围为:0.000993~0.07133。

图 11 反映出各影响因素对击发点火可靠性影响的贡献程度百分比,蓝色条形表示正效应,红色条形表示负效应,条形长短与其相应的影响程度成正比。由图 11 可以看出击针头部直径(IHD)、底火装入深度(PLD)和击针突出量(LO)对击发点火可靠度影响体

表 10 单一影响因素分布均值变化对击发点火可靠度的影响
Table 10 Impact of changes in the mean distribution of a single influencing factor on the reliability of the firing-ignition

AHD / mm	R	PT / mm	R	IHD / mm	R
2.112	0.9216	0.6745	1.0000	1.9	0.7512
2.134	0.8962	0.6816	0.9779	1.92	0.7702
2.178	0.8464	0.68515	0.9622	1.93	0.7788
2.222	0.7976	0.6887	0.9454	1.94	0.7868
2.244	0.7736	0.6958	0.9086	1.96	0.8010
2.266	0.7499	0.7029	0.8674	1.98	0.8126
PLD / mm	R	LO / mm	R	LG / mm	R
0.01	0.7445	1.152	0.6469	0	0.9042
0.02	0.7520	1.164	0.6938	0.1	0.8219
0.03	0.7616	1.188	0.7813	0.15	0.6605
0.04	0.7734	1.212	0.8603	0.2	0.5837
0.05	0.7874	1.248	0.9628	0.3	0.5095
0.06	0.8036	1.26	0.9928	0.35	0.3689

表 11 单一影响因素分布标准差变化对击发点火可靠度的影响
Table 11 Impact of changes in the standard deviation of a single influencing factor on the reliability of the firing-ignition

AHD / mm	R	PT / mm	R	IHD / mm	R
0.06003	0.80333	0.007497	0.80826	0.015003	0.80467
0.063365	0.80333	0.007914	0.80500	0.015837	0.80300
0.066033	0.80167	0.008247	0.80500	0.016503	0.80133
0.067367	0.80000	0.008413	0.80304	0.016837	0.79911
0.070035	0.79333	0.008747	0.80000	0.017504	0.79633
0.07337	0.79167	0.009163	0.79833	0.018337	0.78895
PLD / mm	R	LO / mm	R	LG / mm	R
0.011997	0.83063	0.019503	0.83000	0.0585	0.85333
0.012664	0.81467	0.020587	0.81833	0.06175	0.81571
0.013197	0.80300	0.021453	0.80500	0.06435	0.80500
0.013463	0.79954	0.021887	0.79000	0.06565	0.79889
0.013997	0.79633	0.022754	0.78667	0.06825	0.79667
0.014663	0.78967	0.023837	0.78333	0.0715	0.78200

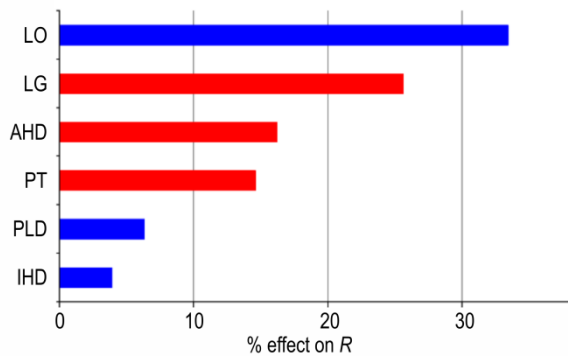


图 11 各影响因素均值变化对击发点火可靠度影响的pareto图
Fig.11 Pareto chart of the mean changes in various influencing factors affecting the reliability of the firing-ignition

现为正效应,分别为+3.9%、+6.3%和+33.4%,即此3种因素增大会使击发点火可靠度增大。这是因为随着击针突出量的增大,底火壳的变形量增大,点火能量增大,药剂热点生成变快,利于击发药的点燃;随着底火装入深度的增加,火台刺入击发药剂时所需的底火壳的变形量减小,减少了击发能量转换为点火能量时的损失,利于击发药的点燃;随着击针头部直径的增大,底火壳的变形量增大,点火能量增大,药剂热点成长速度变快,有利于击发药的点燃。底火壳厚度(PT)、火台头部直径(AHD)、闭锁间隙(LG)对击发点火可靠度的影响则为负效应,分别为-14.6%、-16.2%和-25.6%,即这3种因素增大会使击发点火可靠度减小。这是因为随着闭锁间隙增大,底火壳的变形量减小,点火能量减小,不利于击发药的点燃;随着火台头部直径的增加,火台刺入击发药剂的“针刺”效应减弱,使得药剂热点成长速度变慢,不利于击发药的点燃;随着底火壳厚度增加,底火壳变形所需的能量增加,能量损失变大,点火能量减小,药剂热点生成变慢,不利于击发药的点燃。各影响因素均值变化对击发点火可靠性影响灵敏度大小为:击针突出量>闭锁间隙>火台头部直径>底火壳厚度>底火装入深度>击针头部直径。

5 结论

通过模拟试验装置、数值模型和可靠性分析模型对击发点火系统的点火性能和可靠性进行了系统的研究,主要得到以下结论:

(1)通过建立的可靠性模拟试验装置得到了击发点火系统的压力输出曲线,其中压力启动时间、压力峰值和峰值到达时间可以较好的表征击发点火系统的点火输出性能。

(2)通过仿真模型计算得到的压力启动时间、压力峰值和峰值到达时间与试验结果误差均小于6%。

(3)RSM(Response Surface Model)代理模型相比 RBF(Radial Basis Function)模型、EBF(Ellipsoid Basis Function)模型和 Kriging 模型可以更好的拟合击发点火系统的可靠性结果,枪械击发点火可靠性仿真结果与试验结果误差为 0.72%,研究提出的击发点火可靠性分析模型具有较高的准确性。

(4)各影响因素正态分布的均值变化对击发点火可靠性影响程度为:击针突出量>闭锁间隙>火台头部直径>底火壳厚度>底火装入深度>击针头部直径。其中,击针突出量、底火装入深度和击针头部直径

变化与可靠度变化呈正效应,闭锁间隙、火台头部直径、底火壳厚度则呈负效应;而标准差变化对系统可靠性影响较小。

研究建立的击发点火系统的点火性能模型和可靠性计算模型较好地预测了系统的点火情况,模型可用于枪械击发点火系统结构和装配参数的方案设计,为枪械击发点火系统的可靠性设计提供参考。然而,研究中忽略了环境温度变化对击发药点火性能的影响,导致模型计算与试验结果存在偏差。为了提高模型的准确性,仍需进一步开展模型机理研究。

参考文献:

- [1] 刘莹,晏洋,陈天赋,等.考虑载荷不确定性的转向节结构优化研究[J].机电工程,2020,37(12):1504-1509.
LIU Ying, YAN Yang, CHEN Tian-fu, et al. Optimisation of steering knuckle structure considering load uncertainty[J]. *Mechanical and Electrical Engineering*, 2020, 37(12):1504-1509.
- [2] 李哲.枪械击发点火系统可靠性分析及研究[D].太原:中北大学,2023. DOI:10.27470/d.cnki.ghbgc.2022.000801.
LI Zhe. Reliability analysis and research on firearms firing-ignition system [D]. Taiyuan: North Central University, 2023. DOI:10.27470/d.cnki.ghbgc.2022.000801.
- [3] 王永娟.步兵自动武器现代设计理论与方法[M].北京:国防工业出版社,2014.
WANG Yong-juan. Modern Design Theory and Method of Infantry Automatic Weapons[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2014.
- [4] 高滨.航天火工装置的可靠性[J].导弹火工技术,2000(1):70-73.
GAO Bin. Reliability of aerospace pyrotechnic devices[J]. *Missile Fire Technology*, 2000(1): 70-73.
- [5] 伊泉剑,董海平,翟志强,等.基于应力-强度干涉模型的火工品可靠性设计方法[J].北京理工大学学报,2014,34(10):1007-1011.
YI Xiao-jian, DONG Hai-ping, ZHAI Zhi-qiang, et al. Reliability design method of pyrotechnics based on stress-strength interference model[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2014, 34(10):1007-1011.
- [6] 张天飞,蔡瑞娇,董海平,等.升降法试验下标准差 σ 估计的Monte Carlo分析[J].火工品,2004(02):43-47.
ZHANG Tian-fei, CAI Rui-jiao, DONG Hai-ping, et al. Monte Carlo analysis of standard deviation σ estimation under lift-and-shift test[J]. *Initiators and Pyrotechnics*, 2004(02): 43-47.
- [7] 李定哲,景春温,管小荣.基于FMECA的某自动步枪发射机构可靠性分析[J].装备环境工程,2022,19(6):35-43.
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):35-43.
- [8] 赵聪聪,魏志芳,郭向向,等.一种枪械击发点火系统模拟试验装置设计[J].兵工自动化,2022,41(4):10-13+18.
ZHAO Cong-cong, WEI Zhi-fang, GUO Xiang-xiang, et al. Design of a simulation test device for firearms firing ignition system[J]. *Military Automation*, 2022, 41(4):10-13+18.
- [9] 张文平.某底火击穿漏烟问题的解决[J].火工品,2010(01):42-44.
Zhang Wen-ping. Solution of smoke leakage problem of a primer breakdown[J]. *Initiators and Pyrotechnics*, 2010(01): 42-44.
- [10] 袁克斌.环境因素影响下的机枪典型机构动作可靠性研究[D].南京:南京理工大学,2023. DOI:10.27241/d.cnki.gnjgu.2021.000721.
YUAN Ke-bin. Research on the reliability of typical mechanism action of machine gun under the influence of environmental factors[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2023.
- [11] 张贺,黄毅,刘科言,等.盐雾环境对典型步枪自动机运动影响[J].兵工学报,2024,45(4):1082-1093.
ZHANG He, HUANG Yi, LIU Ke-yin, et al. Effect of salt spray environment on the motion of a typical rifle automatic [J]. *Journal of Military Engineering*, 2024, 45(4):1082-1093.
- [12] 冯文浩.不同工况条件下的通用机枪抽壳故障仿真建模分析与改进设计[D].南京:南京理工大学,2021.
FENG Wen-hao. Simulation modelling analysis and improvement design of general-purpose machine gun extraction failure under different working conditions[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021.
- [13] 郭俊瑞,姚养无,张延平,等.导气式步枪自动机射击动力学仿真分析[J].计算机仿真,2016,33(5):37-41.
GUO Jiao-rui, YAO Yang-wu, ZHANG Yan-ping, et al. Simulation and analysis of dynamics of automatic mechanism for gas-operated rifle [J]. *Computer Simulation*, 2016, 33(5): 37-41.
- [14] 柳吉龄,闫培新,任意,等.枪械可靠性试验统计方案与参数估计研究[J].火力与指挥控制,2019,44(11):186-191.
LIU Ji-ling, YAN Pei-xin, RAN Any, et al. Research on statistical scheme and parameter estimation of firearms reliability test[J]. *Firepower and Command and Control*, 2019, 44(11):186-191.
- [15] 李国新,程国元,焦清介.火工品实验与测试技术[M].北京:北京理工大学出版社,1998:142-150.
LI Guo-xin, CHENG Guo-yuan, JIAO Qing-jie. Experimental and Testing Techniques for Fireworks[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1998: 142-150.
- [16] “枪弹底火通用规范”. WJ 2644-2005.2005.
“General Specification for Primers for Firearms and Ammunition”. WJ 2644-2005.2005.
- [17] GJB 3484-98,枪械性能试验方法[S].
GJB 3484-98, Test methods for firearms performance[S].
- [18] 王扬,戴劲松,王茂森.某型小口径自动火炮抛壳动力学仿真分析[J].兵工自动化,2018,37(8):91-96.
WANG Yang, DAI Jin-song, WANG Mao-sen. Simulation analysis of shell throwing dynamics of a certain type of small-calibre automatic artillery [J]. *Military Automation*, 2018, 37(8): 91-96.
- [19] 高岩.转管武器击发机构可靠性分析与仿真研究[D].太原:中北大学,2019.
Gao Yan. Reliability analysis and simulation research on the striking mechanism of rotary tube weapon [D]. Taiyuan: North Central University, 2019.
- [20] 史亦超,王永娟.某新型自动发射系统动力学仿真研究[J].兵工自动化,2016,35(8):25-32.
SHI Yi-chao, WANG Yong-juan. Simulation study on the dynamics of a new automatic launching system[J]. *Military Automation*, 2016, 35(8): 25-32.

- [21] WEI, Z, XIN C, HOU X, et al. Mechanical-thermal-chemical coupled modeling techniques and numerical simulation methods for the firearm igniting process [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*(2023): e202200244.
- [22] 张忠元, 矫承轩, 桑涛, 等. 车身响应面模型参数的拉丁超立方采样仿真[J]. *计算机仿真*, 2021, 38(7):123-127.
ZHANG Zhong-yuan, ZHOU Cheng-xuan, SAN Tao, et al. Latin hypercube sampling simulation of body response surface model parameters [J]. *Computer Simulation*, 2021, 38(7): 123-127.
- [23] CHEN J, ZHANG W, LIU M, et al. Robust Frontal Vehicle Pose Estimation based on structural parameter optimization using reliable edge point sequences[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(24):12993.
- [24] 张人会, 俞帅年, 郑直, 等. 基于NSGA-II算法及RBF代理模型的两级液环压缩机叶片型线耦合优化分析[J/OL]. *西华大学学报(自然科学版)*: 1-10[2024-07-09].
ZHANG Ren-hui, YU Shuai-nian, ZHENG Zhi, et al. Coupling optimization analysis of blade profile of two-stage liquid ring compressor based on NSGA-II. Algorithm and RBF Surrogate Model[J/OL]. *Journal of Xihua University(Natural Science Edition)*: 1-10[2024-07-09].
- [25] 么大锁, 赵凯芳, 吴国鹏, 等. 基于EBF神经网络的引射器结构参数优化[J]. *机床与液压*, 2023, 51(21):144-149.
MU Da-suo, ZHAO Kai-fang, WU Guo-peng, et al. Optimisation of structural parameters of ejector based on EBF neural network [J]. *Machine Tools and Hydraulics*, 2023, 51(21): 144-149.
- [26] 秦世强, 李宁, 宋任贤. 基于Kriging模型的多次尝试差分进化贝叶斯有限元模型修正[J]. *振动与冲击*, 2024, 43(9): 204-213.DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2024.09.024.
QIN Shi-qiang, LI Ning, SONG Ren-xian. Modification of bayesian finite element model based on Kriging model based on multiple attempts [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2024, 43(9):204-213.DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2024.09.024.
- [27] 郑恒亮, 李聪, 韩俊峰, 等. 基于响应面法的转向架构架结构强度分析[J]. *大连交通大学学报*, 2018, 39(3): 69-74.
ZHENG Heng-liang, LI Cong, HAN Jun-feng, et al. Structural strength analysis of bogie frame structure based on response surface method [J]. *Journal of Dalian Jiaotong University*, 2018, 39(3): 69-74.
- [28] CHUN J. Active learning-based kriging model with noise responses and its application to reliability analysis of structures [J]. *Applied Sciences*, 2024; 14(2):882.
- [29] 薛洪彬. 基于灰色理论的自动武器可靠性及优化决策研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2020.
XUE Hong-bin. Research on Automatic Weapon Reliability and Optimal Decision Making Based on Grey Theory[D]. Shenyang: Shenyang University of Science and Technology, 2020.
- [30] 方峻, 徐诚. 蒙特卡洛方法在枪械零件可靠性分析中的应用[J]. *南京理工大学学报(自然科学版)*, 2002(06): 604-607+624. DOI:10.14177/j.cnki.32-1397n.2002.06.010.
FANG Jun, XU Cheng. Application of monte carlo method in reliability analysis of firearms parts[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2002(06): 604-607+624.
- [31] JIANG D, REN C, ZHAO T, et al. Pressure Transient Model of Water-Hydraulic Pipelines with Cavitation[J]. *Applied Sciences*. 2018, 8(3):388. <https://doi.org/10.3390/app8030388>
- [32] 韩林山, 李向阳, 严大考. 浅析灵敏度分析的几种数学方法[J]. *中国水运*, 2008(04): 177-178.
HAN Lin-shan, LI Xiang-yang, YAN Da-kao. Analysis of several mathematical methods for sensitivity analysis[J]. *China Water Transport*, 2008(04): 177-178.

Simulation Analysis of Ignition Reliability of Firearm Firing-ignition Systems

ZHANG Shu-xia¹, LI Yi-rui², WEI Zhi-fang¹, WANG Zhi-jun¹, ZHANG Ke-bin¹, ZHU Ya-hui¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030000, China; 2. No.208, Research Institute of China Ordnance Industries, Beijing 102202, China)

Abstract: To improve the ignition reliability of firearm firing-ignition systems, the Lagrangian-Eulerian fluid-structure coupling method (ALE) was used to establish the ignition model of the firing-ignition systems, and a parametric simulation platform was built. The pressure start time was used as the ignition output performance characteristic parameter to establish the ignition reliability proxy model of the firearm firing-ignition system. The reliability of the firing-ignition systems under the influence of changes in structure and assembly parameters was simulated and studied. At the same time, based on small-caliber rifle firing-ignition system, an ignition system simulation test device was designed, and experimental research on the ignition performance and reliability of the ignition system was carried out to verify the ignition model. The results show that the error between the calculation results of the firearm firing-ignition reliability analysis model and the experimental results is 0.72%, indicating that the model has good accuracy. The influence rule of the average change of each factor on the system reliability is as follows: striking pin protrusion > locking gap > fire table head diameter > primer shell thickness > primer loading depth > firing pin head diameter. The standard deviation change has little impact on system reliability. This study provides theoretical and technical guidance for the reliability design of firearm firing-ignition systems.

Key words: firearms firing ignition system; ignition performance; proxy model; reliability simulation

CLC number: TJ5; TJ20

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2024147

Grant support: National Natural Science Foundation of China(No. 62003314)

(责编: 姜梅)