

doi: 10.7690/bgzdh.2023.04.001

基于 ISIGHT 平台的枪弹弹头发射强度可靠性分析

苏彦飞, 魏志芳, 张树霞, 于泳波, 王方州
(中北大学机电工程学院, 太原 030051)

摘要: 为提高枪弹发射时的弹头结构强度可靠性, 分析基于 ISIGHT 软件的弹头发射强度可靠性仿真方法。应用 Python 语言建立基于 ABAQUS 软件的枪弹弹头发射强度参数化有限元仿真模型, 采用基于方差降低技术的 Monte Carlo 描述采样方法产生各影响因素随机量, 通过 ISIGHT 软件集成 ABAQUS 软件, 完成多组随机工况下弹头发射强度的参数化驱动循环仿真; 结合应力-强度干涉模型, 完成弹头发射强度的可靠性评估。算例验证结果表明: 该方法具备有效性, 为枪弹弹头结构可靠性分析提供了一种可行的方法。

关键词: 弹头; 发射强度; 参数化仿真; 可靠性仿真; ISIGHT
中图分类号: TJ411 **文献标志码:** A

Reliability Analysis of Bullet Launching Strength Based on ISIGHT Platform

Su Yanfei, Wei Zhifang, Zhang Shuxia, Yu Yongbo, Wang Fangzhou
(School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to improve the structural strength reliability of the bullet when the bullet is launched, the simulation method of launching strength reliability of the bullet based on ISIGHT software is analyzed. The Parametric finite element simulation model of bullet launching intensity based on ABAQUS software was established by using Python language, and the random quantity of each influencing factor was generated by using Monte Carlo description sampling method based on variance reduction technology, and ABAQUS software was integrated by ISIGHT software. The parameterized driving cycle simulation of the warhead launching intensity under multiple random working conditions is completed. The reliability evaluation of the launching strength of the bullet is completed. The example results show that the method is effective, and it provides a feasible method for the reliability analysis of the bullet structure.

Keywords: bullet; launching strength; parametric simulation; reliability simulation; ISIGHT

0 引言

枪弹弹头发射过程中由于强度不可靠会导致外弹道飞行不稳定、金属脱落损坏枪管等问题, 严重时危及战士性命。保证足够的弹头发射强度对于枪弹设计至关重要。发射时弹头在各种载荷作用下, 材料内部产生应力和变形。根据载荷变化特点, 对于一般线膛枪、炮而言, 弹丸受力与变形有 3 个危险的临界状态^[1], 即弹丸挤进膛的第一临界状态、膛压达到最大的第二临界状态和弹丸出枪(炮)口的第三临界状态。理论与试验研究表明, 弹头最大应力通常出现在最大膛压时刻, 故主要考核最大膛压状态时弹头的结构强度。传统弹头强度分析与设计采用理论分析法或有限元仿真法, 能够针对确定的载荷条件、弹头结构与材料特性完成强度分析与校核, 在此基础上再应用安全系数法考虑强度贮备和环境适应能力。由于枪械、弹丸制造中存在的结构不一致, 以及装药量误差等引起的内弹道不一致等

问题, 使得同一批次产品, 仍然存在结构、材料及载荷条件的随机散布问题, 导致在满足强度贮备条件下仍有发生强度失效的概率问题^[2]; 因此, 开展考虑随机因素影响的弹头结构强度的可靠性分析与设计的研究具有重要的理论意义及工程应用价值。在机械产品结构强度的可靠性方面, 国内外学者已经开展了大量研究^[3-5], 但在弹丸发射强度可靠性方面的文献资料较少, 仍然主要依靠靶场试验方法验证弹丸可靠性。

笔者采用 ABAQUS 仿真软件建立枪弹弹头发射强度的有限元仿真模型, 应用 Python 语言开发实现参数化仿真。研究弹头发射强度可靠性分析模型及流程, 通过 Isight 集成平台嵌套 ABAQUS, 建立弹头发射强度可靠性分析流程; 通过蒙特卡洛随机抽样, 实现了考虑结构尺寸随机、材料随机、载荷随机下的弹头发射强度参数化循环仿真, 利用应力-强度干涉模型进行弹头发射强度可靠性分析, 确定了弹头发射强度可靠度, 并分析了各随机因素对可

收稿日期: 2022-12-07; 修回日期: 2023-01-18

基金项目: 国防基础科研项目(A1020131011)

作者简介: 苏彦飞(1997—), 男, 山西人, 硕士, 从事武器系统可靠性优化设计、武器系统仿真技术研究。E-mail: 1378743979@qq.com。

通讯作者: 魏志芳(1974—), 女, 山西人, 博士, 教授, 从事武器系统现代设计方法、武器系统仿真技术、弹箭虚拟设计研究。

E-mail: wzhfang@nuc.edu.cn。

靠度的影响程度。

1 弹头发射强度参数化有限元仿真

以 56 式 7.62 mm 普通弹为研究对象,应用 ABAQUS/Explicit 模块建立最大膛压时刻弹头结构强度有限元仿真模型,应用计算机高级语言 Python 进行 ABAQUS 软件二次开发,修改仿真模型中的各种属性(包括部件建模、材料属性、载荷属性等),实现基于弹头主要结构参数、材料参数及载荷参数的弹头发射强度参数化有限元仿真。

1.1 弹头发射强度有限元仿真与结果分析

弹丸发射过程中的最大膛压时刻是一种瞬时状态,可以看成是准静态问题,ABAQUS/Explicit 模块具有良好的求解准静态问题的能力;因此,采用 ABAQUS/Explicit 方法建立最大膛压状态弹头结构强度的有限元仿真模型,主要包括几何模型建立、材料属性定义、接触模型设置、边界条件加载等。几何模型包括弹头和枪膛部分线膛的装配模型,56 式 7.62 mm 普通弹头为弹头壳/铅套/钢心 3 层结构,枪管线膛采用等齐膛线,结构参数见文献[6],在 ABAQUS 的“PART”模块中分别建立弹头和枪膛部分线膛的 3 维几何模型。其中,弹头草图模型如图 1 所示,为保证结构拓扑关系在参数化建模过程中不变,对弹头圆柱部直径 d_2 、圆柱部长度 l_2 、弹头壳厚度 t_0 进行几何约束,将该草图回转生成弹头几何模型。弹头与枪膛部分线膛的装配模型如图 2 所示。

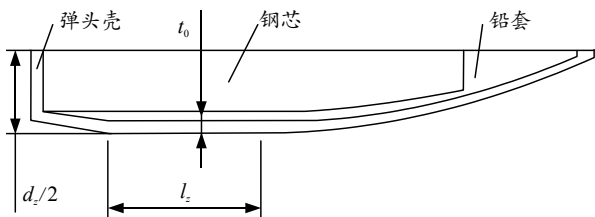


图 1 弹头草图模型



图 2 枪膛弹头装配图模型

7.62 mm 普通弹的弹头壳材料为覆铜钢,钢基为 20#钢, H68 铜层(CuZn37)厚度小于 4%。由于坯料铜层很薄,忽略铜层对材料模型的影响^[7]在仿真中近似采用 20#钢材料,铅套材料为铅,钢芯采用 45#钢,线膛设置为刚性体。具体材料属性如表 1 所示^[8]。

表 1 材料属性

材料	密度/ (g/cm ³)	弹性模 量/MPa	泊松 比	屈服强 度/MPa	抗拉强 度/MPa
20 钢	7.86	210 000	0.270	327.0	396.0
45 号钢	7.89	206 000	0.274	501.0	710.0
铅	11.37	170 000	0.420	4.6	23.3

钢心、铅套几何模型较为规则,选择二阶六面体单元进行网格划分,网格大小为 0.6;采用四面体单元进行弹头壳模型网格划分,单元大小为 0.1;选择四边形壳单元进行线膛模型网格划分,单元大小为 0.3。有限元网格如图 3 所示。

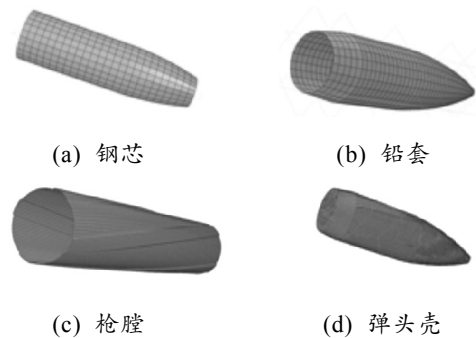


图 3 枪膛弹头模型有限元网格

弹头发射强度仿真属于装配体仿真,由于接触复杂往往不容易收敛,故仿真中选择 ABAQUS/Explicit 显式动力分析步,各模型间采用通用自接触,摩擦因子为 0.1。对线膛模型施加固定全约束,在弹头尾锥部及底部施加最大膛压 280 MPa^[9]。由于弹丸发射过程中最大膛压状态是一个瞬态过程,定义其时间步长为 0.001 s。由公式 $a=F/m=PS/m$ 计算得到弹头轴线方向惯性加速度为 1 724 300 m/s²,其中:膛压 $P=280$ MPa;弹丸质量 $m=11.8$ g。

通过仿真得到弹头应力分布云图如图 4 所示。由图 4 可见:弹头壳发生变形,起到闭气效果;最大等效应力发生在嵌入膛线部分的导转侧面,应力值为 288.3 MPa。弹头挤压应力云图如图 5 所示,圆柱部最大挤压应力为 229.7 MPa。

为验证有限元模型的正确性,根据相关理论进行弹头发射强度的理论分析。

根据枪管等齐膛线的导转侧力计算公式^[10],计算 7.62 mm 普通弹头在膛内运动的导转侧力:

$$N_{\max} = \frac{1}{n} \mu \frac{\pi}{\eta} P_m S = 16.54 \text{ kg} \quad (1)$$

式中: N_{\max} 为最大导转侧压力; P_m 为最大膛压,取 280 MPa; μ 为弹头质量分布系数,取 $\mu=0.48$; n 为膛线数,取 $n=4$; η 为膛线缠度,取 $\eta=31.5$; S 为弹头最大横截面积。

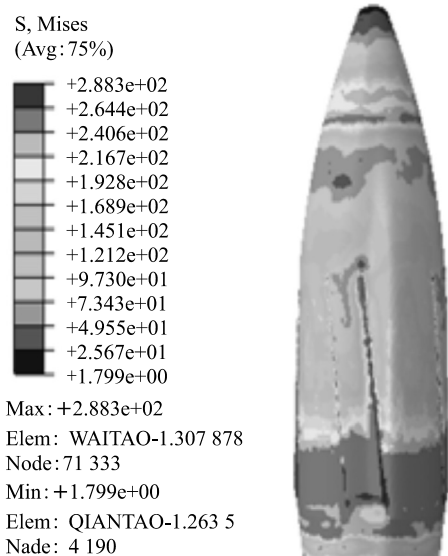


图 4 弹头等效 Mises 应力云图

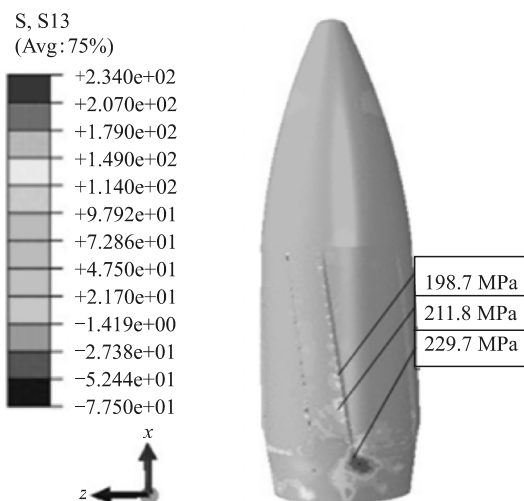


图 5 弹头挤压应力云图

枪管与弹头的公差以及热膨胀量计算:

$$\delta_{\min} = ((d_{yi})_{\min} - (d_{ya})_{\max}) / 2 - i \cdot t \cdot (d_{ya} / 2) = 0.097 \text{ mm}. \quad (2)$$

式中: t 为猛烈射击时枪管变热的平均温度, 一般可达 $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$; i 为钢的线膨胀系数, 取 $12 \times 10^{-6} / \text{ }^{\circ}\text{C}$; d_{yi} 为枪管阴线直径, 取 7.92 mm ; d_{ya} 为阳线直径, 取 7.68 mm 。

弹头圆柱部承受的最大挤压应力为:

$$\sigma_y = N_{\max} / (l_z \cdot \delta_{\min}) = 231.1 \text{ MPa}. \quad (3)$$

式中 l_z 为弹头圆柱部长度, 取 7.15 mm 。

理论计算结果与仿真结果吻合, 从而验证了弹头发射强度仿真模型的正确性。

1.2 参数化有限元仿真的实现方法

Python 语言是 ABAQUS 软件参数化设计语言, 是用来完成有限元常规分析操作或通过参数化

变量方式建立模型的脚本语言, 用智能化分析的手段, 为用户提供自动完成有限元分析过程的功能, 实现参数化有限元仿真。Python 允许复杂的数据输入, 可设置对任何设计或分析属性的控制权, 如控制模型的几何尺寸、材料参数、载荷、边界条件施加的位置及网格密度等的变化。

在有限元仿真中生成的命令流文件“abaqus.rpy”的基础上, 应用 Python 语言对其二次开发实现基于主要结构参数、材料参数及载荷的参数化有限元仿真, 模拟几何随机、材料随机及载荷随机的仿真工况。具体为: 用 Python 语言修改 ABAQUS 软件工作目录“temp”下命令流文件“abaqus.rpy”, 将弹头几何模型中圆柱部直径、圆柱部长度、弹头壳厚度的具体数值、材料屈服强度的具体数值、载荷设置的具体值分别用相应的变量替换, 建立参数化几何模型, 保持网格划分、接触定义、求解参数等其他设置不变, 得到弹头发射强度参数化仿真的命令流文件“abaqus.rpy”, 执行 ABAQUS 软件批处理命令, 进行参数化有限元仿真。

2 主要影响因素的随机采样

影响弹头发射强度的随机因素主要包括膛压、弹头材料参数、弹头结构尺寸等, 这些参数均服从一定分布规律。根据实验数据和设计经验, 笔者主要考虑弹头圆柱部长度 l_z 、弹头圆柱部直径 d_z 、弹头壳厚度 t_0 、最大膛压 P_m 、弹头壳材料弹性模量 E 和泊松比 μ 这 6 个随机变量对弹头发射强度可靠性的影响。

针对枪弹弹头这类一次性部件, 为保证部件安全和简化计算过程, 上述随机变量均认为服从正态分布。根据弹头结构尺寸的制造误差, 依据 3σ 准则确定弹头结构参数的正态分布模型; 根据 Kent 机械工程手册给出的钢材弹性模量统计数据^[11], 可确定弹头壳材料弹性模量正态分布模型。具体分布参数如表 2 所示。

表 2 随机变量及其分布

随机变量	分布类型	均值	标准差
l_z / mm	正态分布	7.15	0.580
d_z / mm	正态分布	7.92	0.396
$P_m / (\text{kg}/\text{cm}^2)$	正态分布	2800.00	35.000
t_0 / mm	正态分布	0.56	0.006
E / MPa	正态分布	206000.00	206.000
μ	正态分布	0.30	0.003

ISIGHT 软件中, 蒙特卡洛随机采样方法有 2 种: 传统的简单随机采样以及随机数生成器; 基于

方差降低技术的描述采样。采用方差降低技术的描述采样法只需用较少的采样点，就能得到无论在误差水平还是在可信水平上，都与简单随机采样极为相似的结果。将每一个随机变量所定义的空间分为相等的概率子空间，对每一个随机变量子空间的分析只进行一次，在正态分布空间对每个随机变量作进一步的描述，离散每个变量空间中的每一行和每一列在随机顺序中只被取样一次。根据上述 6 个随机变量的正态分布模型，应用 ISIGHT 软件 Monte Carlo 模块分别对 6 个变量进行描述采样，生成相应的随机工况，样本量设置为 1 000。

3 弹头发射强度可靠性仿真

3.1 可靠性分析模型

利用应力-强度干涉模型，进行弹头发射强度可靠度分析，模型如图 6 所示。根据弹头结构参数、材料及载荷等随机因素分布规律获取各随机变量组合的随机工况，通过基于 ABAQUS 软件的弹头发射强度有限元仿真得到各组随机工况下弹壳最大应力值，经统计可得出其概率分布函数 $f(\sigma)$ ；通过材料机械性能统计得到材料强度的分布函数 $f(\delta)$ ；应力值大于材料强度的区域为不可靠区域，见图中阴影部分，用 1 减去该面积即可得到弹头发射强度可靠度。

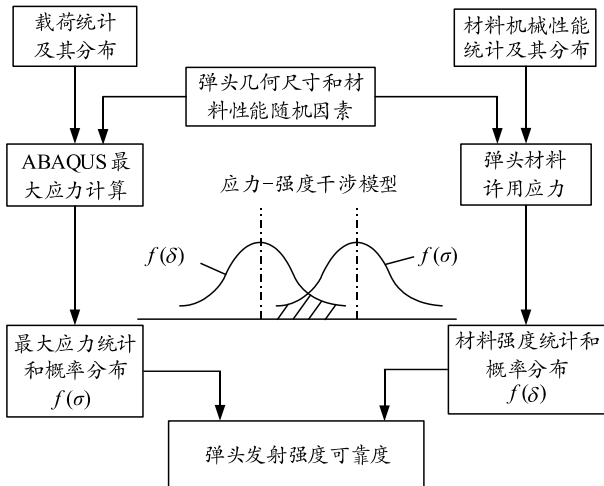


图 6 弹头发射强度可靠性分析模型

弹头发射强度可靠性分析流程如图 7 所示，包括产生满足随机变量概率分布的随机工况，调用 ABAQUS 软件完成弹头发射强度有限元仿真，提取仿真结果，重复以上过程 n 次，得出 n 次仿真产生的最大应力值结果，应用可靠性分析模型得出弹头发射强度可靠性结果。

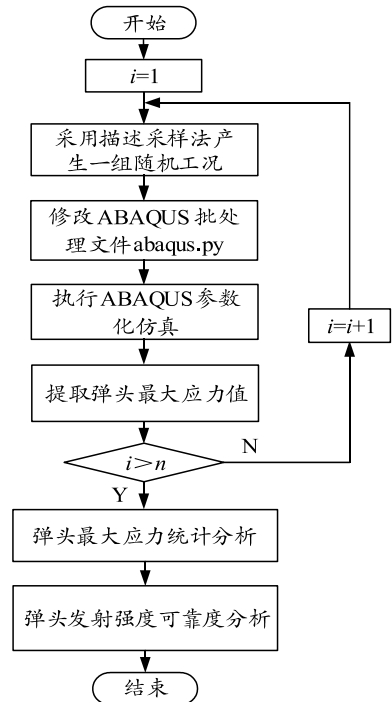


图 7 弹头发射强度可靠性分析流程

3.2 基于 ISIGHT 的弹头发射强度可靠性分析

ISIGHT 是一种通过搭积木的方式快速继承和耦合各种仿真软件，使整个设计流程实现全数字化和全自动化的集成软件。通过在 Isight 集成界面中添加 Monte Carlo 组件生成多个随机工况，添加 Simcode 组件集成 ABAQUS 参数化仿真批处理文件，实现对应多种随机工况的弹头发射强度循环仿真。

在 ISIGHT 软件中定制实现的可靠性分析流程^[12]如图 8 所示，将 Monte Carlo 组件和 Simcode 组件添加到 ISIGHT 软件 workflows 中。

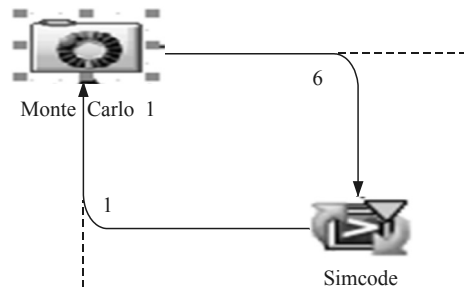


图 8 弹头发射强度可靠性分析流程定制

其中，在 Monte Carlo 组件中定义各随机变量 l_z 、 d_z 、 P_m 、 t_0 、 E 和 μ 的正态分布模型，设置采样数 n 为 1 000，采用描述采样法产生随机变量对应的随机工况。

在 Simcode 组件中添加弹头发射强度参数化仿真的批处理文件“abaqus.bat”，设置输入文件

“abaqus.py”和输出文件“output.txt”。完成参数映射和工作流创建。根据 Monte Carlo 组件产生的随机工况修改命令流文件“abaqus.rpy”中相关参数；通过命令“C:\SIMULIA\Abaqus\Commands\abaqus.bat”caenogui=abaqus.py 运行批处理文件“abaqus.bat”调用 ABAQUS 软件完成有限元仿真，输出仿真结果；在 ODB 文件中搜索最大应力点，输出相应应力值到输出文件“output.txt”中。

4 弹头发射强度可靠性分析结果

4.1 弹头发射强度可靠度计算

运行 Isight 的 Design Gateway 模块，按照蒙特卡洛随机采样结果对弹头发射强度实施循环仿真。每次应用蒙特卡洛组件根据描述抽样法产生一组随机工况 ($l_z, d_z, P_m, t_0, E, \mu$)，修改命令流文件“abaqus.rpy”中相关参数，应用 Simcode 组件完成对应的一次发射强度有限元仿真，输出最大应力结果到“output.txt”文件。以上过程重复 1 000 次，将获得 1 000 组最大应力仿真结果。应用 Monte Carlo 模块可以统计得到弹头发射过程中最大应力的正态分布关系，其概率分布直方图如图 9 所示。

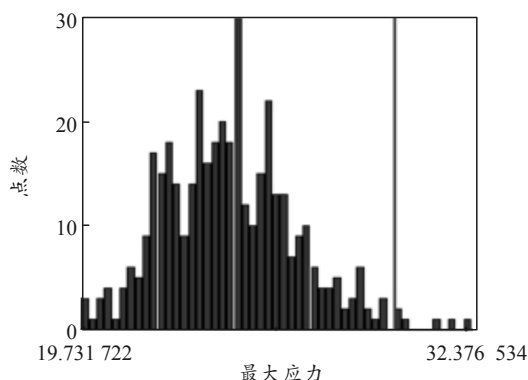


图 9 弹头最大应力的概率分布直方图

弹头发射不可靠主要有弹壳变形过大，摩擦过大造成炸膛，当应力值超过材料强度 80% 时，需进行局部应变分析^[13]。根据以上弹头发射强度可靠性分析流程，在 Monte Carlo 组件中定义最大应力值上限值为材料屈服强度的 80%，对弹头最大应力计算结果进行筛选，统计得到 7.62 mm 枪弹弹头发射强度可靠度为 99%，均值为 0.99，标准值为 0.099 623，最小值为 0，最大值为 1.0，概率大于下限 0.5 (97.5% 单侧置信区间) 值为 0.99~0.009 763 1，概率小于上限 1.5 值为 1.0，极限之间的概率为 0.99。

4.2 结果分析

从理论分析和试验验证 2 方面对以上仿真结果

进行分析。

根据应力-强度干涉模型，弹头强度可靠度可根据下式计算：

$$R = P(S - s > 0) = P(Z > 0). \quad (4)$$

式中： R 为弹头强度可靠度； S 为弹头材料许用应力； s 为弹丸在载荷作用下产生的应力。

由于强度及应力均服从正态分布，安全余量 Z 也服从正态分布，满足：

$$f(Z) = e^{-(Z - \mu_Z)/\sigma_Z)^2 / 2} / \sqrt{2\pi}\sigma_Z. \quad (5)$$

式中： $\mu_Z = \mu_S - \mu_s$ ； $\sigma_Z = (\sigma_S^2 + \sigma_s^2)^{1/2}$ 。

则可靠度为：

$$R = P(Z > 0) = \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Z} e^{-(Z - \mu_Z)/\sigma_Z)^2 / 2} dZ. \quad (6)$$

可写成如下标准正态形式：

$$R = \int_0^{\infty} f(Z) dZ = \int_0^{\infty} \varphi(z) dz = 1 - \Phi_{z_0}. \quad (7)$$

式中： $\varphi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2}$ ； $z = (Z - \mu_Z)/\sigma_Z$ ； $z_0 = -\mu_Z /$

$$\sigma_Z = -(\mu_S - \mu_s) / (\sigma_S^2 + \sigma_s^2)^{1/2}.$$

只要知道强度以及应力的分布参数后，就能够计算出 z_0 的值，在正态分布表中就可以查出可靠度 R 的值。

根据弹头强度计算理论，编写弹头强度计算程序。根据上述 6 个随机变量的正态分布参数，应用 Matlab 编程产生服从该分布的 1 000 组随机变量，调用弹头强度计算程序完成 1 000 次仿真计算，针对 1 000 次计算结果，再用 Matlab 仿真得出弹头最大应力满足正态分布 $s(228, 0.071)$ ，同样得出弹头强度满足正态分布 $S(261.6, 0)$ 。代入上式可得安全余量 Z 服从正态分布 $Z(33.6, 0.071)$ ，查表可得弹头发射强度为 0.991 3，与以上仿真结果相符。计算结果与弹头发射强度可靠性验证试验结果相符。

根据国军标枪弹定型试验要求，完成了 6 组共 300 发枪弹的弹头破裂试验，考核弹头强度可靠性。射击用枪为 56 式 7.62 mm 半自动步枪，每组试验数量为 50 发枪弹，将枪固定于枪架上，在自然气温无风条件下，以点射的方式对 100 m 处的松木靶 (1.5 m×1.5 m) 实施穿靶试验，通过检查穿孔形状来判断弹头是否发生破裂，圆形视为未发生破裂，其他形状说明弹头发生破裂。试验结果如表 3 所示，表明共有 2 发弹发生了弹头破裂，故弹头强度可靠度为 0.993，与仿真结果相符。

表 3 弹头强度可靠性试验结果

组数	靶上穿孔形状			
	圆形	椭圆形	弹头形	不规则形状
1	50	0	0	0
2	50	0	0	0
3	49	0	0	1
4	50	0	0	0
5	50	0	0	0
6	49	1	0	0

图 10 所示为 Isight 仿真中的 Pareto 图, 反映随机变量对目标值的贡献程度, 得到弹头发射强度可靠性仿真中随机变量对输出结果的动态量化关系。从图中可知圆柱部长度 l_z 和最大膛压 P_m 对最大应力增加贡献最明显, 最大膛压的平方 P_m^2 对减小最大应力较明显, 从弹丸结构设计考虑, 要增加弹头发射强度可靠度首先考虑圆柱部长度。

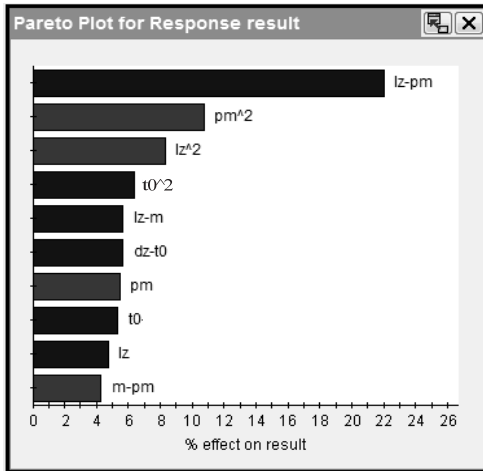


图 10 ISIGHT 仿真 Pareto 图

5 结论

笔者基于 Isight 软件嵌套 ABAQUS 有限元仿真对枪弹弹头发射强度可靠性进行分析, 得到弹头发射强度可靠度, 以及影响可靠度的主要因素, 为枪弹弹头发射强度可靠性分析提供一种基于有限元仿真的分析方法, 具体结论如下:

1) 分析基于 ABAQUS 软件的枪弹弹头发射强度有限元建模及仿真方法, 应用 Python 语言进行 ABAQUS 软件二次开发, 完成了 56 式 7.62 mm 普通弹头发射强度主要影响因素的参数化和最大膛压状态时结构强度的有限元仿真, 仿真结果与理论分析结果吻合;

2) 结合影响弹头发射强度主要因素的随机分布模型, 研究了基于 ISIGHT 软件的随机因素采样方法及仿真结果概率统计方法;

3) 分析基于仿真的弹头发射强度可靠性分析模型及流程, 完成了基于 ISIGHT 软件的 56 式 7.62 mm 普通弹头发射强度可靠性分析方法及结果验证。同时分析得出影响弹头发射强度可靠度的主要因素为圆柱部长度 l_z 和最大膛压 P_m 。

参考文献:

- [1] 刘成柱. 影响弹丸起始扰动的大口径火炮结构参量研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016: 7-16.
- [2] KAYMAZ I. Application of Kriging method to structural reliability problems[J]. Structural Safety, 2005, 27(2): 133-151.
- [3] 贺谦. 多学科耦合系统可靠性分析方法研究[J]. 机械强度, 2017, 39(1): 63-66.
- [4] GHOLIBEIGI M, HEIJENK G, MOLTCHANOV D, et al. Analysis of a receiver-based reliable broadcast approach for vehicular networks[J]. Vehicular Networking Conference, 2016, 37(1): 89-96.
- [5] KESHTEGAR B, KISI O. M5 model tree and Monte Carlo simulation for efficient structural reliability analysis[J]. Applied Mathematical Modeling, 2017, 48(8): 899-910.
- [6] 刘国庆, 徐诚. 弹药参数及误差对弹头膛内运动的影响研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2017, 38(1): 1-6.
- [7] 肖善超. 弹壳多模一次连续变薄拉伸工艺研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012.
- [8] 曾正明. 机械工程材料手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 32-35.
- [9] 丁传俊, 张相炎, 刘宁. 身管内膛参数化模型及其磨损有限元模型的生成方法[J]. 兵工学报, 2016, 37(12): 2212-2219.
- [10] 罗刚, 付怀清, 陈守强. 枪管渐速膛线数控电解加工方法的研究[J]. 机床与液压, 2016, 44(20): 14-16.
- [11] 王新刚, 李鹤, 吕春梅. 硬质合金刀具的动态可靠性灵敏度研究[J]. 兵工学报, 2014, 35(1): 114-119.
- [12] 柏迅. 枪弹弹头发射强度可靠性分析方法研究[D]. 太原: 中北大学, 2017.
- [13] 胡登高, 范迅. 液压支架强度可靠性及敏感性分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2016, 35(6): 636-641.