

基于随机有限元法的武器身管寿命预测

樊黎霞, 刘 伟

(南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094)

摘要:针对武器身管的寿命预测往往采用确定性有限元分析方法,但这种确定性解法不能正确反映实际情况下个别随机参数对身管寿命的不确定性影响。将某口径速射武器作为研究对象,基于随机有限元分析方法,利用瞬态动载荷身管温度场的计算结果,结合身管内膛径向磨损量计算经验公式,采用蒙特卡罗法求解,得出内膛径向磨损量的分布规律,利用 MATLAB 曲线拟合以及积分工具得出身管烧蚀寿命分布,从而为身管弹道寿命的设计提供理论参考。

关键词:随机有限元;蒙特卡罗法;身管烧蚀寿命

中图分类号:TJ303

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2013)02-0008-04

Prediction of Weapon Barrel Life Based on Stochastic FEM

FAN Li-xia, LIU Wei

(College of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In view of the prediction of weapon barrel life, people often use the deterministic FEM, but the deterministic solving method is unable to correctly reflect the uncertain influence of individual random parameters on barrel life in real situation. Considered a rapid-fire weapon as the research object, based on the stochastic FEM, using the calculation results of the barrel temperature field in transient and dynamic load, combined with the conventional calculation formula of barrel inner surface radial wearing, and using the Monte Carlo Method to solve, the distribution data of barrel inner surface radial wearing is drawn. This study processed the distribution data by the curve fitting and integration tools of Matlab and finally drew the distribution of barrel thermal ablation life which can provide a theoretical reference for the design of the barrel ballistics life.

Key words: stochastic FEM; Monte Carlo Method; Barrel Thermal Ablation Life

现代高技术战争下,对于武器的性能要求越来越高,同时,更大射程、更高精度的要求也使得身管受到更高的强度和更严重的热作用,身管作为武器重要部件,其寿命成为制约武器发展的最重要因素之一。身管寿命分为疲劳寿命和烧蚀寿命,随着材料性能及热处理技术的提高,身管的疲劳寿命已经基本能得到保证,烧蚀寿命也就成为了身管寿命的决定性因素。对于身管寿命的有限元模拟,往往单一采用确定性的分析方法,但是这种确定性分析方法没有考虑身管加工过程的材料参数以及尺寸参数的随机误差对寿命的

影响。本文基于随机有限元分析方法,将身管危险截面的尺寸和材料参数随机化,通过多次蒙特卡罗模拟,最终得出身管烧蚀寿命预测结果。

1 身管寿命计算模型

本文中研究对象选用某型号重机枪身管,国内外学者研究了多种身管烧蚀寿命计算模型^[1],这里选取身管内膛最大径向磨损量模型

收稿日期:2012-12-10

作者简介:樊黎霞(1965—),女,教授,主要从事 CAE 及应用、系统安全及可靠性分析、金属材料液压成形工艺及装备、加工模拟及模具和工艺参数优化设计等研究。

$$W = \sum_{i=1}^N W_i \leq W_{\max} \quad (1)$$

式中: W 表示总磨损量; W_i 表示单发磨损量; W_{\max} 表示内膛径向最大允许磨损量。

$$W_{\max} = 2(t_{sh} + A) \quad (2)$$

式中: t_{sh} 为膛线高度; A 为常数, 这里取 t_{sh} 的数值。

身管内膛单发烧蚀磨损量为^[2]:

$$W_i = Ae^{bT_i} \quad (3)$$

式中: W_i 单位为 mm; A, b 为经验常数, 这里分别取 0.000 001 38 和 0.004 5^[2-3]; T_i 为单发子弹膛壁最高温度。

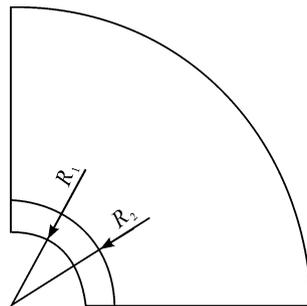


图2 模型尺寸示意图

表1 输入参数及分布类型

参数	分布类型	均值	标准差	最小值	最大值
K1	高斯正态分布	36.1	1.805	—	—
C1	高斯正态分布	502.4	25.12	—	—
DEN1	均匀分布	—	—	6 471.9	7 910.1
K2	高斯正态分布	33.8	1.69	—	—
C2	高斯正态分布	480.3	24.015	—	—
DEN2	均匀分布	—	—	7 020.9	8 581.1
R1	高斯正态分布	0.008	0.000 04	—	—
R2	高斯正态分布	0.008 3	0.000 041 5	—	—

2 身管可靠性分析

本文采用 ANSYS 中的 PDS 模块^[4], 考虑武器身管在制造过程中可能产生的一些误差, 对身管的一些材料参数及尺寸参数进行随机化, 在编写 APDL 程序时, 将身管烧蚀量计算公式写入程序, 然后采用拉丁超立方抽样, 进行多次蒙特卡罗模拟, 从而得出一组射击后身管烧蚀量的均值及方差。蒙特卡罗模拟的计算量非常大, 本文中的载荷是时变载荷, 载荷步比较多, 花费的计算时间更多, 取身管危险截面的四分之一模型进行计算, 能够有效缩短计算时间。依据 GJB3484—1998 枪械性能试验方法和枪械制造和验收规范, 分别使用 20 发、30 发一组 2 种射击规范进行 ANSYS 确定性分析^[5], 其中 20 发组射击分为 3 个短点射, 30 发组射击长、短点射结合。

2.1 生成确定性分析宏文件

建立危险截面 1/4 有限元模型, 如图 1 所示, 进行可靠性分析时, 先按前面所述进行 2 种射击规范第一组 20、30 发子弹的温度场分析, 将分析过程写成宏文件, ANSYS 在进行可靠性分析过程中会多次调用该宏文件。

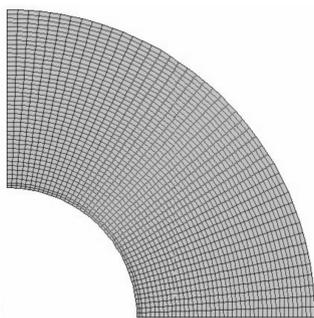


图1 危险截面 1/4 有限元模型

2.2 定义随机输入参数

定义随机输入参数时, 材料参数有镀铬层导热系数 K1、比热容 C1、密度 DEN1, 身管钢导热系数 K2、比热容 C2、密度 DEN2。尺寸参数有内壁半径 R1、镀铬层与身管钢连接处半径 R2, 如图 2 所示。随机输入参数分布类型如表 1 所示, 将一组射击后的身管烧蚀磨损量 W 作为随机输出参数。

2.3 输出结果

利用蒙特卡罗法进行分析时, 抽样次数直接影响着计算精度, 抽样次数越多计算结果越准确, 但是计算量就剧增, 计算时间太长, 因此合理选择抽样次数至关重要, 本文中的算例选择 500 次模拟, 图 3、图 4 分别是 2 种不同射击规范下身管烧蚀磨损量 W 的样本均值历史。

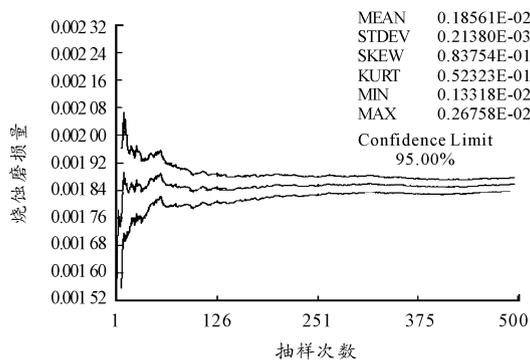


图3 W 样本均值历史(射击规范 1)

从图 3、4 可以看出, 一组射击结束后, 2 种射击规范得出的分布分别为:

均值 $\mu_1 = 0.001 856 1$ mm, 标准差 $\sigma_1 = 0.000 213 80$ mm; 均值 $\mu_2 = 0.003 174 0$ mm, 标准差 $\sigma_2 = 0.000 362 06$ mm。随着抽样次数的增多, 身管烧蚀磨损量 W 的样本均值上下限高度差趋向平稳, 抽样次数达到 400 次后, 高度差已经稳定下来, 说明模拟 500 次就足够得出准确的分析结果,

如果计算机性能足够,尽量进行多次抽样,使得计算结果更准确。

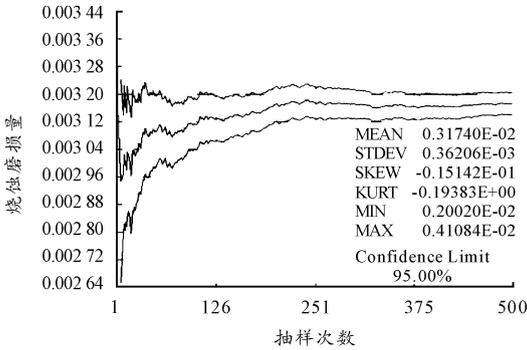


图4 W样本均值历史(射击规范2)

3 身管寿命计算

在计算身管寿命时,采用前面所述的身管内膛最大径向磨损量模型^[6], $W_{\max} = 2(t_{sh} + A)$, 这里最大径向磨损量 $W_{\max} = 0.58$ mm, 鉴于两种射击规范在射击一组之后都冷却至常温, 所以假设后面每一组的烧蚀情况都与第一组相同, 算出总共射击多少组就可以得出身管预测寿命。本文假设每一组的烧蚀量服从正态分布, 所以组数 $Z = \frac{W_{\max}}{W}$, $W_{\max} = 0.58$ mm, $W \sim N(\mu, \sigma^2)$, 为了得出身管寿命, 就要先算出组数 Z 的期望与方差:

$$E(Z) = \int_{-\infty}^{+\infty} zf(z) dz \quad (4)$$

$$D(Z) = E(Z^2) - [E(Z)]^2 \quad (5)$$

根据概率论中的相关定理^[7], 因为 $z = \frac{0.58}{w}$ 在 $w > 0$ 时

严格单调, 同时, 其反函数 $h(z)$ 有连续导函数, 则 $Z = \frac{W_{\max}}{W}$ 的密度函数为

$$f(z) = f_w[h(z)] |h'(z)| = \frac{0.58}{\sqrt{2\pi\sigma z^2}} e^{-\frac{(0.58-u)^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

在计算 $E(Z)$ 与 $D(Z)$ 时, 先要得出 2 个积分函数 $zf(z)$ 和 $z^2f(z)$, 这里设 $m(z) = zf(z)$ 、 $n(z) = z^2f(z)$ 根据式(6)可知

$$m(z) = \frac{0.58}{\sqrt{2\pi\sigma z}} e^{-\frac{(0.58-u)^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

$$n(z) = \frac{0.58}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(0.58-u)^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

将 μ_1 、 σ_1 分别代入式(7)、式(8), 可以得出积分函数 $m(z)$ 、 $n(z)$ 在坐标系中的曲线如图5、图6。

对这 2 个函数积分, 即求曲线与横轴所围区域面积, 鉴于这 2 个积分函数本身形式复杂, 进行积分计算时, 难以求得结果, 利用 Matlab 软件的曲线拟合功能, 将积分函数转化为容易积分的高斯多项式形式:

$$m(z) = \frac{0.58}{\sqrt{2\pi\sigma z}} e^{-\frac{(0.58-u)^2}{2\sigma^2}} \approx$$

$$a_1 * \exp\left(-\left(\frac{z-b_1}{c_1}\right)^2\right) + \dots + a_5 * \exp\left(-\left(\frac{z-b_5}{c_5}\right)^2\right) \quad (9)$$

式中: $a_1 = 0.004482$, $b_1 = 309.7$, $c_1 = 1.365$, $a_2 = 1.522$, $b_2 = 309.1$, $c_2 = 31.5$, $a_3 = 1.524$, $b_3 = 331.8$, $c_3 = 42.55$, $a_4 = 0.4672$, $b_4 = 362.9$, $c_4 = 62.33$, $a_5 = 1.282$, $b_5 = 283.9$, $c_5 = 28.61$ 。

$$n(z) = \frac{0.58}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(0.58-u)^2}{2\sigma^2}} \approx$$

$$a_1 * \exp\left(-\left(\frac{z-b_1}{c_1}\right)^2\right) + \dots + a_5 * \exp\left(-\left(\frac{z-b_5}{c_5}\right)^2\right) \quad (10)$$

式中: $a_1 = 301.4$, $b_1 = 351.3$, $c_1 = 47.49$, $a_2 = 528.2$, $b_2 = 323.4$, $c_2 = 37.21$, $a_3 = 462.8$, $b_3 = 299.9$, $c_3 = 30.67$, $a_4 = 68.12$, $b_4 = 386.4$, $c_4 = 68.33$, $a_5 = 176.4$, $b_5 = 278.2$, $c_5 = 26.05$ 。

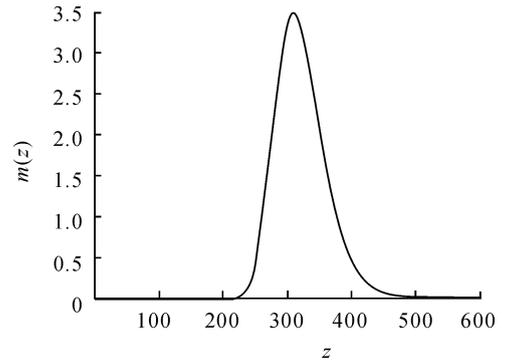


图5 射击组数期望积分函数曲线(射击规范1)

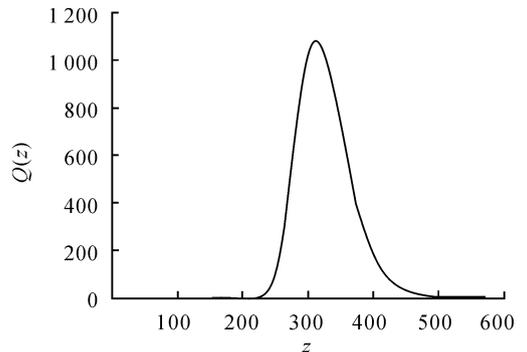


图6 射击组数方差积分函数曲线(射击规范1)

利用 Matlab 软件对式(9)进行积分, 结果为 316.5414, 对式(10)进行积分, 结果为 101760。

$$\therefore E(Z) = \int_{-\infty}^{+\infty} zf(z) dz = 316.5414$$

$$D(Z) = E(Z^2) - [E(Z)]^2 =$$

$$101760 - 316.5414^2 = 1561.542$$

在组数的期望与方差得出后, 就可以计算出武器身管在

射击规范 1 情况下的总寿命 N 为

$$\text{期望: } E(N) = 20 * E(Z) = 6\ 330.828 \approx 6\ 331$$

$$\text{标准差: } \sigma_N = \sqrt{D(N)} = \sqrt{20 * D(Z)} = 176.722$$

同理,将 μ_2, σ_2 分别代入公式(7)、(8),可以得出积分函数 $m(z), n(z)$,然后对其进行积分,结果为 184.430 7 和 34 742。

$$\therefore E(Z) = \int_{-\infty}^{+\infty} m(z) dz = 184.4307$$

$$D(Z) = E(Z^2) - [E(Z)]^2 =$$

$$34\ 742 - 184.4307^2 = 727.3169$$

在组数的期望与方差得出后,就可以计算出武器身管在射击规范 2 情况下的总寿命 N 为

$$\text{期望: } E(N) = 30 * E(Z) = 5\ 532.921 \approx 5\ 533$$

$$\text{标准差: } \sigma_N = \sqrt{D(N)} = \sqrt{30 * D(Z)} = 147.714$$

4 结束语

本文基于随机有限元分析方法,对 2 种射击规范下的武器身管烧蚀寿命进行了预测,得出的结果是射击规范 1 比射击规范 2 寿命多 798 发,但其标准差更大,预测出的烧蚀寿命的不确定性更大。因此在武器射击中,对于速射武器尤其要注意其射击规范,尽量减少连射发数,增加点射组数,能够有效提高身管寿命,本文的研究结果也为身管弹道烧蚀寿命的设计提供理论参考。

(责任编辑 杨继森)

(上接第 7 页)

经过比较 4 个方向的总排序值,可知方向 4 为该内层防御重点方向。

4 结论

在分析判断海军驻泊地域抗击敌巡航导弹内层重点方向时需要考虑较多因素。本文利用 AHP 法建立模型,为选择内层防御最优内层重点方向进行了定性定量分析,为指挥员在进行驻泊地域抗击敌巡航导弹确定内层重点防御方向提供了一种方法,该模型仍有待于进一步深入研究,需要在实践中不断检验、调整并逐步完善。

参考文献:

[1] SATTY T L. The analytic hierarchy process [M]. New

参考文献:

- [1] 张喜发,卢兴华. 火炮烧蚀内弹道学[M]. 北京:国防工业出版社,2001:193-195.
- [2] 高付申. 火炮身管寿命预测问题的研究[J]. 南京理工大学学报,1997,21(3):231.
- [3] 陈龙森,钱林方. 复合材料身管烧蚀与寿命问题的研究[J]. 兵工学报,2005,26(6):808-810.
- [4] 王金龙,王清明,王伟章. ANSYS12.0 有限元分析与范例解析[M]. 北京:机械工业出版社,2010:242-244.
- [5] 吴永海. 速射武器身管现代设计理论研究[D]. 南京:南京理工大学,2010:108-110.
- [6] 求是科技. MATLAB7.0 从入门到精通[M]. 北京:人民邮电出版社,2011:196-230.
- [7] 茆诗松,程依明,濮晓龙. 概率论与数理统计[M]. 北京:高等教育出版社,2011:123-125.
- [8] 欧阳青,于存贵,张延成. 国内外火炮身管烧蚀磨损问题研究进展[J]. 兵工自动化,2012(6):44-46.
- [9] 张燕军,祖健,徐旭,等. 基于烧蚀磨损理论的某新型高炮内弹道性能预测[J]. 四川兵工学报,2010(8):29-31.
- [10] 祁春阳,郑立评,甘霖,等. 火炮身管内径检测方法研究[J]. 装备环境工程,2011(5):82-84.

(责任编辑 杨继森)

York:McGraw-Hill Company,1980.

- [2] 康鹏. 现代防空系统中目标识别算法研究之一[J]. 现代防御技术,1998,26(1):24-30.
- [3] 董守贵. 基于 Matlab 的层次分析法实现[J]. 航空兵器,2003(4):16-18.
- [4] 郭张龙,李为民,申卯兴. 地空导弹部队阵地选择方案多层次灰色评价[J]. 系统工程与电子技术,2002,24(11):69-72.
- [5] 陈冀生,罗卫. 用层次分析法优选供货商[J]. 重庆理工大学学报:自然科学版,2011(12):120-124.
- [6] 王树勋. 层次分析法中排序的一种新方法[J]. 陕西工学院学报,1999,15(4):46-49.

(责任编辑 周江川)