

doi: 10.7690/bgzdh.2024.02.001

# 基于最小二乘法线性回归的火炮身管寿命预测

孔刚鹏, 周焯博, 刘洋, 刘浩, 杨志超

(中国华阴兵器试验中心, 陕西 华阴 714200)

**摘要:** 为直观地判断火炮身管寿命, 提出一种基于最小二乘法线性回归的预测方法。根据靶场身管参数试验数据分析火炮身管内径、药室长、弯曲度随射弹数增加的变化规律; 利用最小二乘法线性回归建立火炮身管磨损量与射弹数的关系式; 对某型火炮身管寿命进行预测。结果表明: 该方法能够较为准确地预测出火炮身管寿命且算法简单, 便于推广使用, 可为火炮射击、退役报废等提供重要参考。

**关键词:** 身管; 寿命; 预测; 最小二乘法; 线性回归

**中图分类号:** TJ306 **文献标志码:** A

## Life Prediction of Gun Barrel Based on Least Squares Linear Regression

Kong Gangpeng, Zhou Xuanbo, Liu Yang, Liu Hao, Yang Zhichao

(China Huayin Ordnance Test Center, Huayin 714200, China)

**Abstract:** In order to judge the life of gun barrel intuitively, a prediction method based on least square linear regression was proposed. According to the test data of gun barrel parameters in shooting range, the change law of gun barrel inner diameter, chamber length and bending degree with the increase of projectile number is analyzed, the relationship between gun barrel wear and projectile number is established by least square linear regression, and the life of a certain type of gun barrel is predicted; The results show that the method can accurately predict the life of gun barrel, and the algorithm is simple and easy to popularize, which can provide an important reference for gun firing, retirement and scrapping.

**Keywords:** barrel; life; prediction; least square method; linear regression

### 0 引言

无论是地面压制火炮、装甲突击武器、防空高射炮, 还是舰炮或岸炮, 火炮身管均是火炮的重要部件, 身管寿命是火炮全寿命过程都必须重视的问题<sup>[1]</sup>。目前火炮身管寿命预测的主要方法有 BP 神经网络<sup>[2]</sup>、灰色线性回归<sup>[3]</sup>、改进支持向量机<sup>[4]</sup>和随机 Wiener 过程<sup>[5]</sup>等, 这些方法虽然预测精度较高, 但算法比较复杂, 一般部队操作人员很难掌握, 不易在炮兵部队推广使用。靶场有大量的身管参数试验数据, 靶场测量的身管参数定量试验数据有身管内径、弯曲度、药室长等; 定性试验数据有身管内膛疵病检查。对试验数据做具体分析, 从而利用试验数据寻找数据内在规律预测火炮身管寿命。靶场和部队在火炮使用过程中最常用的方法就是统计射弹数, 最为直观地判断火炮身管寿命的方法就是预测火炮身管的射弹数。

最小二乘法线性回归法与上述预测方法相比, 算法简单、使用 Matlab 软件就可预测火炮身管寿命, 不需要单独编程, 部队技术人员易于掌握, 便于在部队推广使用; 因此, 利用靶场身管试验数据, 根

据最小二乘法线性回归法预测火炮身管寿命, 进而得出火炮身管允许的最大射弹数和剩余射弹数。

### 1 火炮身管性能退化随射弹数变化规律分析

以某型火炮身管试验数据为例, 图 1—4 分别为射弹数为 5、521、1 022 发时火炮身管弯曲度、内径磨损量、药室增长量。

#### 1.1 火炮身管弯曲度随射弹数增加变化趋势

火炮身管弯曲度随射弹数增加变化趋势如图 1 所示。

从图 1 中可看出, 随着射弹数的增加, 弯曲度分别在垂直方向和水平方向的 3 次测量数据比较接近, 弯曲度值会产生变化, 但变化不大, 射弹数增加对身管弯曲度没有产生明显的影响。

#### 1.2 火炮身管内径磨损量随射弹数增加变化趋势

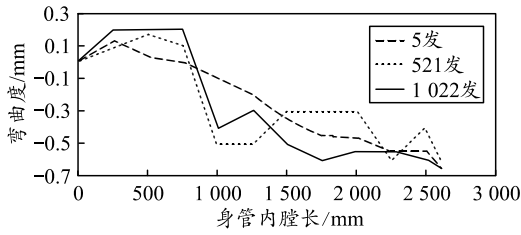
图 2 和 3 分别为某型火炮身管阴线、阳线在水平方向和垂直方向内径磨损量试验数据。

从 3 图中可看出, 身管阳线和阴线的磨损规律基本一致, 都是从靠近膛线起始部身管磨损量明显

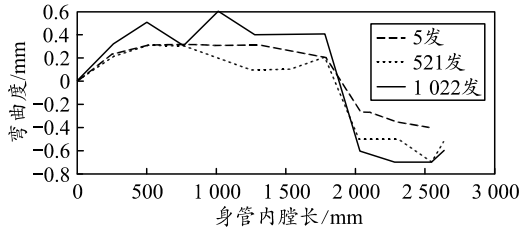
收稿日期: 2023-10-11; 修回日期: 2023-11-18

第一作者: 孔刚鹏(1978—), 男, 陕西人, 硕士。

增大，而且随着射弹数增加，这一段身管内径磨损量显著增加。

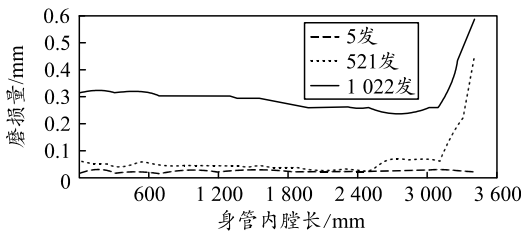


(a) 水平方向

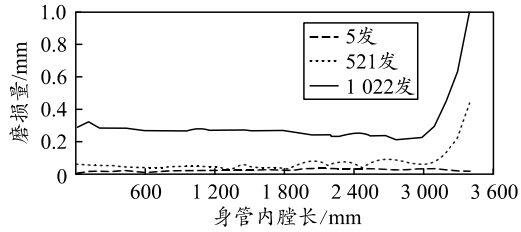


(b) 垂直方向

图 1 弯曲度随射弹数增加变化趋势

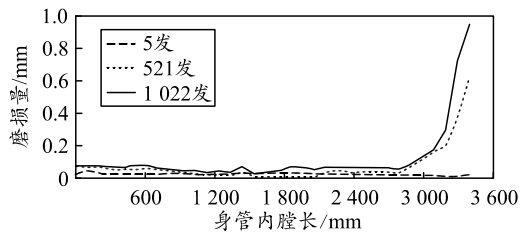


(a) 水平方向

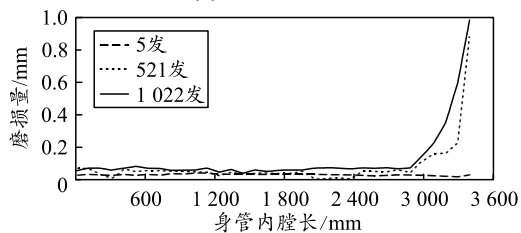


(b) 垂直方向

图 2 阴线磨损量随射弹数增加变化趋势



(a) 水平方向



(b) 垂直方向

图 3 阳线磨损量随射弹数增加变化趋势

### 1.3 火炮身管药室增长量随射弹数增加变化趋势

火炮身管药室增长量随射弹数增加变化趋势如图 4 所示。

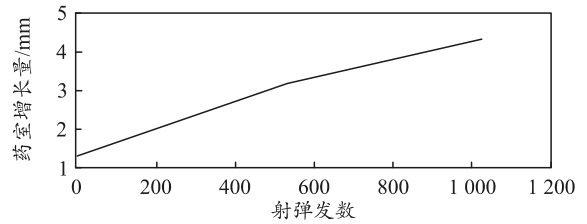


图 4 药室增长量随射弹数增加变化趋势

从上图中可以看出，药室增长量与射弹数成近似线性关系。药室长随着射弹数的增加而明显增加，药室长增大的主要原因是膛线起始部的不断磨损，造成弹丸位置不断前移，总的来说，也是由于起始部膛线的径向磨损量增大引起的。

从对身管弯曲度、药室长、内径等试验数据的分析可知，身管弯曲度随着射弹数增加，变化并不明显，引起药室长增加的根本原因是由身管内径磨损量增加引起的。烧蚀和磨损是造成火炮身管性能退化的最主要原因。身管内径磨损量是表征火炮身管性能状态变化的最主要参数，故将身管内径磨损量作为判定火炮身管性能状态，预测火炮身管寿命的主要参数。

## 2 最小二乘法多项式拟合预测火炮身管寿命

最小二乘法通过最小化误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配。最小二乘法建模迅速，易实现。

### 2.1 最小二乘法多项式拟合原理

采用最小二乘法进行曲线拟合的本质是通过样本集构造范德蒙德矩阵，将一元  $n$  次多项式回归问题转化为  $n$  元一次线性回归问题<sup>[6]</sup>。

设给定一组数据点  $(x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_i, y_i)$ ，其中  $i=1, 2, \dots, m$ 。求近似曲线  $y = \varphi(x)$ ，使其与  $y = f(x)$  的偏差最小，使偏差平方和最小。

$$\min \sum_{i=1}^m \delta_i^2 = \sum_{i=1}^m (\varphi(x_i) - y_i)^2 \quad (1)$$

按照偏差平方和最小的原则选取拟合曲线，并且采取多项式方程为拟合曲线的方法，称为最小二乘法。

设定拟合多项式为  $y = a_0 + a_1x + \dots + a_kx^k$ ，偏差平方和表示如下：

$$R^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1x + \dots + a_kx^k)]^2$$

对右侧等式  $a_i$  求偏导数，以求符合条件的  $a$  值。  
对  $a_0$  求偏导：

$$-2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1 x + \dots + a_k x^k)] = 0;$$

对  $a_1$  求偏导：

$$-2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1 x + \dots + a_k x^k)] x_i = 0;$$

对  $a_2$  求偏导：

$$-2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1 x + \dots + a_k x^k)] x_i^2 = 0;$$

对  $a_k$  求偏导：

$$-2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1 x + \dots + a_k x^k)] x_i^k = 0.$$

等式可以简化为：

$$a_0 n + a_1 \sum_{i=1}^n x_i + \dots + a_k \sum_{i=1}^n x_i^k = \sum_{i=1}^n y_i;$$

$$a_0 \sum_{i=1}^n x_i + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 + \dots + a_k \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} = \sum_{i=1}^n x_i y_i;$$

$$a_0 \sum_{i=1}^n x_i^2 + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^3 + \dots + a_k \sum_{i=1}^n x_i^{k+2} = \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i;$$

$$a_0 \sum_{i=1}^n x_i^k + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} + \dots + a_k \sum_{i=1}^n x_i^{k+k} = \sum_{i=1}^n x_i^k y_i.$$

用矩阵可以表示为：

$$\begin{pmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^k \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^k & \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^{k+k} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^k y_i \end{pmatrix}.$$

将矩阵简化后得到：

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^k \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \dots & x_2^k \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \dots & x_n^k \end{pmatrix}, \quad \mathbf{Y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}.$$

上述矩阵可以简化为： $\mathbf{X}^T \mathbf{X} \mathbf{a} = \mathbf{X}^T \mathbf{Y}$ ，结果可以计算出：

$$\mathbf{a} = (\mathbf{X}^T * \mathbf{X})^{-1} * \mathbf{X}^T * \mathbf{Y}. \quad (2)$$

矩阵  $\mathbf{a}$  中对应的项则是拟合曲线的各项系数。

### 2.2 建立火炮身管寿命预测函数

假设有一组内径磨损量数据  $\Delta d = (y_1, y_2, \dots, y_i)$ ，其对应的射弹数  $n = (n_1, n_2, \dots, n_i)$ ；首先将不同装药的射弹数根据换算公式统一换算到相同装药号

下的射弹数。一般情况下统一换算到全装药下的射弹数。等效全装药系数为<sup>[7]</sup>：

$$\text{EFC} = (P_m / P_{m1})^{1.4} (v_0 / v_{01}). \quad (3)$$

式中： $P_m$ 、 $v_0$  分别为需要等效装药的膛压、初速； $P_{m1}$ 、 $v_{01}$  分别为标准弹药的膛压、初速。

根据式(3)换算后对应的等效射弹数为  $x = (x_1, x_2, \dots, x_i)$ ，建立内膛磨损量与射弹数之间的关系式：

$$y = a_0 + a_1 x + \dots + a_k x^k.$$

根据最小二乘法多项式拟合原理，利用式(2)计算出多项式系数，从而建立内膛磨损量与射弹数之间的关系式。根据国军标规定的火炮身管内膛最大磨损量预测出火炮身管寿命终止时的最大射弹数，根据已有射弹数预测出火炮身管的剩余寿命。

### 3 火炮身管寿命预测与分析

以某型火炮身管为例，其身管阳线起始部磨损量数据如表 1 所示，身管随射弹数增加实际磨损曲线如图 5 所示。

表 1 某型火炮身管阳线起始部内径磨损量 mm

射弹数	磨损量	射弹数	磨损量
5	0.017	521	0.619
50	0.078	578	0.642
155	0.128	622	0.698
208	0.153	675	0.712
260	0.188	728	0.778
304	0.245	815	0.805
356	0.378	866	0.823
405	0.415	938	0.893
455	0.487	1 022	0.944

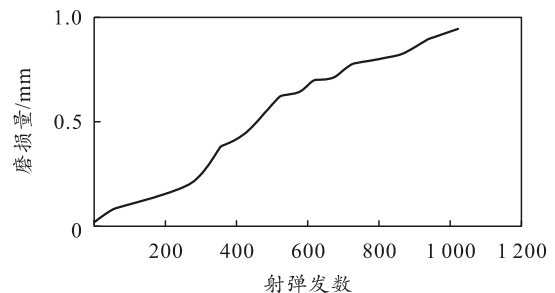


图 5 火炮身管随射弹数增加实际磨损曲线

根据最小二乘法拟合出阳线磨损量  $\Delta d$  与射弹数  $x$  之间的函数表达式  $\Delta d = f(x)$ 。利用 Matlab 软件根据最小二乘法求多项式的原理分别得出一次多项式、二次多项式、三次多项式的拟合曲线，通过比较可知，一次多项式拟合曲线与实际磨损曲线最为接近；因此，选择一次多项式  $y = a_1 x + a_0$  进行曲线拟合，在 Matlab 中计算出：

$$a_1 = 0.001 0, \quad a_0 = 0.006 9.$$