

# 炮管内表面磨损图像的检测技术研究

郑 军 徐春广 肖定国 黄 卉 理 华

(北京理工大学机械与车辆工程学院, 北京 100081)

**摘 要** 炮管内表面的磨损对火炮的弹道学性能有决定性的影响, 其磨损状态的检测对火炮的使用、维护和寿命评估也有重要作用。炮管的磨损基本上可分为两种: 一种称为磨蚀磨损, 它是由弹丸和炮管内膛的摩擦作用形成的, 它使得膛线炮管内膛的膛线变得越来越光滑; 另一种为烧蚀磨损, 它是由弹药燃烧所产生的高温高压气体造成的炮管内表面磨损, 它的表现形式为一系列的烧蚀裂纹和蚀坑。这两种磨损具有不同的表现形式和评价标准, 有必要对这两种磨损进行区分和分别检测。在炮管图像中, 由于膛线边界和由烧蚀形成的裂纹和蚀坑边界具有不同的方向特征: 膛线边界具有一个特定的方向, 表现为各向异性; 而裂纹和蚀坑的边界则没有特定的方向, 表现为各向同性, 因此边界的方向性可以作为区分、检测烧蚀磨损和磨蚀磨损的一种手段。为了正确地对这两种磨损进行检测, 首先对磨蚀磨损和烧蚀磨损特征进行了数学建模, 并提出、证明了磨损特征算子和相应的磨损检测算法, 试验证明, 该算法能有效地对炮管内膛的磨蚀磨损和烧蚀磨损特征进行区分和计算, 从而实现了炮管磨损特征的图像检测。

**关键词** 磨损 烧蚀磨损 磨蚀磨损 图像检测 图像算子

中图分类号: TP391.41 TJ306 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2004)03-0323-05

## The Image Detection Technique on Wear Detecting of the Artillery Pipe's Inner Surface

ZHENG Jun, XU Chun-guang, XIAO Ding-guo, HUANG Hui, LI Hua

(School of Mechanical and Vehicular Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

**Abstract** The wear condition of the artillery pipe is decisive to ballistic performance of the artillery and its detection is important to the using, maintenance and life evaluation. There are two types wear on the inner surface, the one is called friction wear, which is caused by the friction between the bullet and pipe's inner surface, making the rifling edge became smoother and smoother, the another is called ablation wear, which is caused by the high temperature and pressure gas produced by the fire powder, resulting cavities and flaws on the inner surface. These two types wear exhibit different appearance and have different evaluation criterions, it's necessary to divide these two types wear and give a respective detection. In the image of the inner surface of artillery pipe, the property which tell apart the edge of the rifling and the edge of the flaw and cavity is its direction; the edge of the rifling has a certain direction and shows a character of anisotropy but the edge of the flaw and cavity has no certain direction and shows a character of general isotropy. So the degree of the direction can be employed to divide the two types edge and measure the two types wear. Base on this, the mathematic modes of the friction wear and scrape wear are established, the direction image operator and its relative algorithm is proposed and proved, which can divide and detect the ablation wear and scrape wear from the image, realizing the image detection of the artillery body pipe's wear degree.

**Keywords** wear, ablation wear, scrape wear, image detection, image operator

## 1 引 言

炮管内表面的磨损对火炮的弹道学性能有决定

性的影响, 其磨损检测对火炮的使用、维护和寿命评估具有重要的意义, 通常的磨损检测是对内表面图像进行处理, 即首先进行缺陷目标分割、标记和特征提取以及模式识别, 然后对炮管内表面的质量进行

评价。由于这种算法耗时长,而且在大多数情况下是不必要的,因此本文通过对炮管内表面缺陷的综合特征进行分析和计算后得到了能够反映炮管两种内表面缺陷程度的综合指标。根据这个指标就可以了解炮管内表面的质量状况,以便进行进一步的处理。

## 2 炮管内表面磨损特征分析和特征数学模型的建立

### 2.1 炮管内表面磨损特征分析

炮管磨损是由发射药在炮膛中所生成的炽热高压气体对炮管产生化学作用及炮弹在通过炮管时的摩擦作用所造成的。由炮膛中的炽热高压气体的化学作用所造成的磨损叫做烧蚀磨损,烧蚀磨损的影响往往是局部的,这种情况称为烧蚀裂痕;由炮膛和弹丸之间的摩

擦产生的磨损称为磨蚀磨损,它会逐渐将炮膛表面的金属磨去,弹带与炮管阳线导转侧之间的机械摩擦使得炮管阳线棱角变圆<sup>[1]</sup>。如图1所示,其中图1(a)为较新的炮管内部图像,其烧蚀磨损和磨蚀磨损程度都较小;图1(b)的烧蚀磨损程度较小,而磨蚀磨损程度较大;图1(c)的烧蚀磨损程度较大,而磨蚀磨损的程度较小,图1(d)的烧蚀磨损和磨蚀磨损的程度都较大。由图1可知,在面积相同的图像中,若烧蚀裂痕边缘的长度越长,且在边缘处的梯度值越大,则烧蚀磨损的程度就越严重;而在相同的炮管膛线长度的情况下,若其边界的过渡宽度越大,阳线的棱角越圆滑,边界的梯度越小,则说明磨蚀程度越严重。可见,由于烧蚀磨损和磨蚀磨损针对的对象不同,其判断的标准也不同(甚至相互矛盾),因此有必要对烧蚀裂痕和炮管膛线加以区分对待,以利于对烧蚀磨损和磨蚀磨损进行检测。

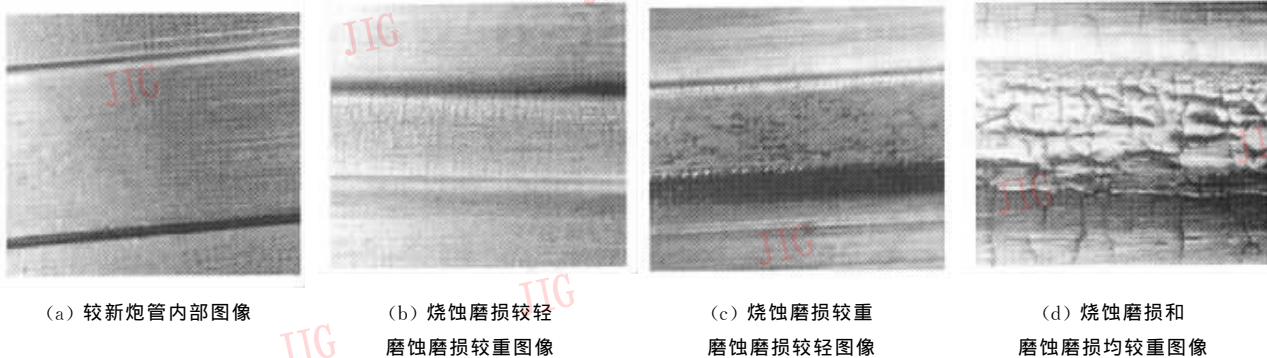


图1 炮管内部图像

### 2.2 特征数学模型的建立

设  $b(x, y)$  为炮管内表面图像的边缘图像,  $h(x, y)$  为炮管膛线的边缘图像,  $r(x, y)$  为烧蚀裂痕的边缘图像, 则对任意  $(x, y)$  有

$$b(x, y) = h(x, y) + r(x, y) \quad (1)$$

$$h(x, y) \cdot r(x, y) = 0 \quad (2)$$

在边缘图像  $b(x, y)$  中, 由于  $h(x, y)$  区别于  $r(x, y)$  的一个重要特征是其方向性, 即在  $h(x, y)$  中, 膛线的边界方向在一个以角度  $\gamma$  ( $\gamma$  为膛线的加工方向) 为中心的小范围角度  $\delta$  内变化, 并表现为各向异性; 而  $r(x, y)$  中, 烧蚀裂痕的边缘方向在各个方向角度都是均等的, 表现为各向同性, 因此进行炮管图像边界方向性特征的检测和度量是实现炮管两种磨损检测的关键问题, 同时炮管图像中边界的位置应不影响检测结果, 即检测方法应满足方向敏感性和位置无关性两个特性。在这种前提下, 炮管膛线边界等价(通过平移, 令所有的炮管膛线边界中心重合)为一个矩形区域

$S_{\text{Rect}}$ , 其长轴长度为  $L$ , 短轴为  $W$ , 长轴的方向为  $\gamma$ , 其中  $L \times W$  代表炮管膛线边界线的总长度, 而  $\delta = \arctan(W/L)$  代表膛线边界的角度范围,  $\gamma$  代表角度中心, 定义  $k = \tan \delta = W/L$  为磨蚀磨损参数, 它反映了磨蚀磨损程度的大小; 而烧蚀裂痕的边界(具有不同的方向, 其方向概率是随机的)等价为一个半径为  $R$  的圆形区域  $S_{\text{Round}}$ , 定义  $T = \pi R^2/A$  ( $A$  为图像面积) 为烧蚀磨损参数, 它反映了烧蚀磨损程度的大小。

## 3 磨损特征算子的提出和磨损参数的计算

由第1节可知, 磨损检测方法首先应满足位置无关性和方向敏感性两种特性, 而满足这种特性的常用图像处理方法有纹理特征分析等方法, 由图1也可以看到, 烧蚀裂痕边界和膛线边界图像的纹理特征明显不同, 但用纹理特征来度量烧蚀磨损和磨蚀磨损具有一定的难度, 具体表现在如下两点:

(1) 纹理特征的物理意义不明显。纹理特征是细小物体在图像中大量地重复出现的形状、大小,阴影、色调的综合反映,通常采用统计方法或频域分析方法来提取,如纹理能量法,灰度共生矩阵法小波变换法以及傅里叶功率谱等方法来提取<sup>[2]</sup>,但从炮管两种磨损检测的角度来看,其物理意义并不明显。

(2) 纹理特征用于磨损检测的精度不够。纹理特征如纹理能量,灰度共生矩阵等,由于其方向一般取  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ ,而区分膛线边界和烧蚀裂痕边界的主要特征——膛线的方向角度的精度较高,一般在  $1'$  之内,因此用纹理特征度量炮管磨损必然有较大的误差。为此本文提出一种新的图像算子——磨损特征算子来实现炮管磨损的检测。

### 3.1 磨损特征算子提出

对任意二维图像  $f(x, y)$ , 定义函数  $M(\theta, \hat{x}, f(x, y))$  为  $f(x, y)$  在坐标系  $\hat{x}\hat{y}$  中沿  $\hat{y}$  轴方向的积分( $\hat{x}\hat{y}$  由原始坐标系  $xoy$  逆时针旋转  $\theta$  角形成)。

$$M(\theta, \hat{x}, f(x, y)) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) d\hat{y} \\ = \int_{-\infty}^{\infty} f(\hat{x}\cos\theta - \hat{y}\sin\theta, \hat{x}\sin\theta + \hat{y}\cos\theta) d\hat{y} \quad (3)$$

其中,  $(\hat{x}, \hat{y})^T = H_\theta(x, y)^T$ ,  $H_\theta = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$ ,

(下同)

则磨损特征算子  $P(\theta, f(x, y))$  定义为

$$P(\theta, f(x, y)) = \int_{-\infty}^{\infty} M^2(\hat{x}, \theta, f(x, y)) d\hat{x} \\ = \int_{-\infty}^{\infty} \left( \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) d\hat{y} \right)^2 d\hat{x} \quad (4)$$

### 3.2 磨损特征算子性质

(1) 位置无关性

假定对任意函数  $f(x, y)$  进行了一个偏移  $(\Delta x, \Delta y)$ , 即为  $f(x_1, y_1) = f(x - \Delta x, y - \Delta y)$ , 则有

$$(x_1, y_1)^T = (x - \Delta x, y - \Delta y)^T \quad (5)$$

$$(\hat{x}_1, \hat{y}_1)^T = H_\theta(x_1, y_1)^T = H_\theta(x, y)^T + H_\theta(\Delta x, \Delta y)^T \\ = (\hat{x}, \hat{y})^T - H_\theta(\Delta x, \Delta y)^T \quad (6)$$

对式(6)取导数有

$$d\hat{x} = d\hat{x}_1, d\hat{y} = d\hat{y}_1 \quad (7)$$

由式(7)可以得到

$$P(\theta, f(x + \Delta x, y + \Delta y)) = \int_{-\infty}^{\infty} \left( \int_{-\infty}^{\infty} f(x_1, y_1) d\hat{y} \right)^2 d\hat{x}$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \left( \int_{-\infty}^{\infty} f(x_1, y_1) d\hat{y}_1 \right)^2 d\hat{x}_1 \\ = \int_{-\infty}^{\infty} \left( \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) d\hat{y} \right)^2 d\hat{x} \\ = P(\theta, f(x, y)) \quad (8)$$

由此可以看到,图像的位置与算子的作用结果无关,位置无关性得证。

(2) 方向敏感性

为了验证算子的方向敏感性,可对一个长度为  $L$ , 宽度为  $W$ , 长轴的角度为  $\gamma$  的矩形区域  $S_{\text{Rect}}$ , 和一个半径为  $R$  的圆形区域  $S_{\text{Round}}$  进行检测。因为在 2.2 节中讨论了在算子  $P$  作用下,两种磨损的等价性,所以可以用  $h(x, y)$  和  $r(x, y)$  作为炮管两种磨损图像的函数表达,而不再作区别。其中  $h(x, y)$  和  $r(x, y)$  分别为矩形区域函数和圆形区域函数

$$h(x, y) = \begin{cases} 1 & (x, y) \in S_{\text{Rect}} \\ 0 & (x, y) \notin S_{\text{Rect}} \end{cases} \quad (9) \\ r(x, y) = \begin{cases} 1 & (x, y) \in S_{\text{Round}} \\ 0 & (x, y) \notin S_{\text{Round}} \end{cases}$$

根据式(4)中的定义,有

$$P(\theta, h) = \begin{cases} L^2 W / \cos\varphi - L^3 \sin\varphi / (3\cos^2\varphi) & \varphi \leq \delta \\ W^2 L / \sin\varphi - W^3 \sin\varphi / (3\sin^2\varphi) & \varphi > \delta \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $\varphi = \text{mod}(|\gamma - \theta + \pi/2|, \pi/2)$

$$P(\theta, r) \equiv 16R^3/3 \quad (11)$$

图 2 为  $L=1000, W=600, \gamma=8^\circ$  的不同  $\theta$  角度下矩形区域的  $P(\theta, h)$  计算值曲线。

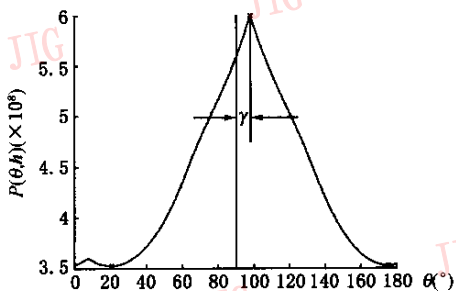


图 2 磨损特征算子特性

由图 2 可以看到,对矩形区域,当  $\theta = 90^\circ + \gamma$ ,  $P(\theta, h)$  有明显的峰值点;而对于圆形区域则为常值,这说明了检测算子的方向敏感性。

(3) 其他特性

将膛线的边缘图像  $h(x, y)$  和烧蚀裂痕的边缘图像  $r(x, y)$  施图像算子(分别用  $h$  和  $r$  表示)。根据

上述(1)(2)性质可知,函数  $M(\hat{x}, \theta, h)$  和函数  $M(\hat{x}, \theta, r)$  不相关,有

$$P(\theta, b) = P(\theta, b+r) = P(\theta, h) + P(\theta, r) + 2 \int_{-\infty}^{\infty} (M(\theta, \hat{x}, h) \cdot M(\theta, \hat{x}, r)) d\hat{x} = P(\theta, h) + P(\theta, r) \quad (12)$$

由式(11)(12)知,对任意  $\theta_1, \theta_2$  有

$$P(\theta_1, b) - P(\theta_2, b) = P(\theta_1, h) - P(\theta_2, h) \quad (13)$$

对  $P(\theta, b)$  归一化后,再计算  $\theta = 0 \sim \pi$  的面积  $S(h)$ :

$$S(h) = \int_0^{\pi} \frac{P(\theta, h) - (P(\theta, h))_{\min}}{(P(\theta, h))_{\max} - (P(\theta, h))_{\min}} d\theta \quad (14)$$

经计算可知,  $S(h)$  是仅与  $k = W/L$  有关的函数,可记做  $S(k)$ ,如图3所示,  $k \in (0, 0.717)$  区间,由于  $S(k)$  单调(在一般情况下有  $k < 0.4$ ),因此可在  $k \in (0, 0.717)$  区间获得  $S(k)$  的反函数  $V(s)$ ,其中  $s$  为  $S(k)$  计算值。

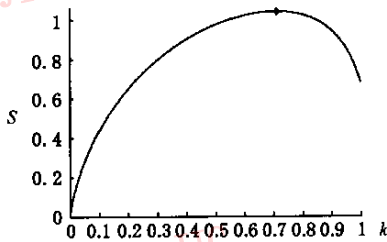


图3  $S(k)$  函数曲线

### 4 检测流程

根据以上磨损特征算子的特性,可通过如下检测流程来进行炮管的磨损检测:

(1) 计算炮管内表面图像  $i(x, y)$  的边缘图像  $b(x, y) = e(x, y) \cdot g(x, y)$ , 其中  $e(x, y)$  为  $i(x, y)$  的边界图像,  $g(x, y)$  为梯度图像<sup>[3]</sup>。这样,  $b(x, y)$  不仅能够反映炮管内表面图像的边界,而且能够反映该图像边界处的梯度。

(2) 根据式(4)计算磨损检测曲线  $P(\theta, b)$ 。

(3) 计算

$$S(k) = \int_0^{\pi} \frac{P(\theta, h) - (P(\theta, h))_{\min}}{(P(\theta, h))_{\max} - (P(\theta, h))_{\min}} d\theta$$

并求得磨蚀磨损参数  $k = \frac{W}{L} = V(s)$ 。

(4) 计算  $D = W \cdot L(L - W) = P(\pi/2 + \gamma, h) -$

$P(\gamma, h) = P(\pi/2 + \gamma, b) - P(\gamma, b)$ , 并得到  $L = \sqrt[3]{D/k(1-k)}$  和  $W = k \cdot L$ 。

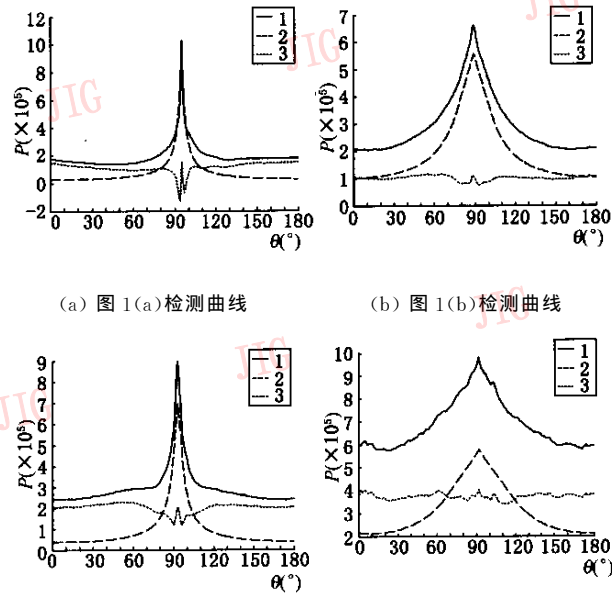
(5) 根据计算所得到的  $W$  和  $L$  和已知的  $r$ , 即可由式(10)计算磨蚀磨损检测曲线  $P(\theta, h)$ 。

(6) 计算烧蚀磨损检测曲线  $P(\theta, r) = P(\theta, b) - P(\theta, h)$ 。

(7) 计算烧蚀磨损检测参数  $T = \pi R^2/A$ , (其中  $R = \sqrt[3]{3 \overline{P(\theta, r)}/16}$ ,  $\overline{P(\theta, r)}$  为  $P(\theta, r)$  的均值,  $A$  为图像  $i(x, y)$  面积)。

### 5 试验

根据第3节的检测流程,本文对图1中的4幅炮管图像进行了磨损检测,其结果如图4和表1所示,图4中曲线1为磨损检测曲线  $P(\theta, b)$ ; 曲线2为磨蚀磨损检测曲线  $P(\theta, h)$ , 该曲线越尖锐,说明磨蚀磨损程度越小; 曲线3为烧蚀磨损曲线  $P(\theta, r)$ , 该曲线的均值越小,说明烧蚀磨损的程度越小。由图4还可以看到,  $P(\theta, r)$  的变化范围远远小于  $P(\theta, b)$  和  $P(\theta, h)$ , 故可以看作是常数(仅在以  $\theta = 90 + \gamma$  为中心的小范围内有波动,因为在此处,  $M(\hat{x}, \theta, r)$  和  $M(\hat{x}, \theta, h)$  呈现一定的相关性,所以产生了一定的计算误差),这说明烧蚀磨损边界方向各向同性,也说明了本文第1节中所提出磨蚀磨损和烧蚀磨损的数学模型的正确性。表1为检测结果



(a) 图1(a)检测曲线

(b) 图1(b)检测曲线

(c) 图1(c)检测曲线

(d) 图1(d)检测曲线

图4 检测曲线图

表 1 检测结果

图名	参数				
	$L$	$W$	$k$	$R$	$T$
图 1(a)	299.378 20	9.840 507 8	0.032 869	27.575 891	0.019 501 71
图 1(b)	143.694 24	26.935 507	0.187 450	26.601 114	0.018 147 35
图 1(c)	233.990 52	12.643 644	0.054 034	33.471 337	0.028 731 60
图 1(d)	115.797 14	43.071 803	0.371 959	42.216 208	0.045 706 34

数据,其中, $k$ 代表磨蚀磨损的程度, $T$ 代表烧蚀磨损的程度,由图 4 的检测曲线和表 1 的数据可以看出,其检测结果和实际情况相符合,说明本文提出的算法是有效的。

## 6 结 论

由上述分析可以看出,本文提出的检测算法可以有效地实现对炮管内膛的烧蚀磨损和磨蚀磨损进行检测,如果结合专家对磨损程度的评判标准(目前还没有),则可很容易实现炮管磨损的定量检测。本方法的主要局限性是计算量较大,主要应用在炮管磨损的非实时检测中。虽然检测中,假设烧蚀磨损的边界方向具有各向同性,但是针对某些炮管的烧蚀情况并不适合,因为膛线边界方向是一个先验知识,并且烧蚀裂痕的边界强度和方向性远小于膛线的边界,所以本算法仍具有有效性,但会产生一定的误差,其误差的修正需要进一步的研究。

### 参 考 文 献

1 [英]Ryan J W. 火炮及火箭[EB/OL]. <http://www.ssreader.com.cn/> (in Chinese):42~46.

2 安斌,陈书海,陈华,等. 纹理特征在多光谱图像分类中的应用[J]. 激光与红外, 2002,32(3):188~190.

3 阮秋琦. 数字图像处理学[M]. 北京:电子工业出版社, 2001.



郑 军 1971 年生,1994 年获哈尔滨工程大学工学学士学位,2000 年获华北工学院硕士学位,2003 年获北京理工大学博士学位。现在清华大学机械工程系从事监控检测技术、无损检测技术图像检测和处理等方面的研究。

徐春广 1964 年生,1995 年获北京理工大学博士学位,博士生导师。主要从事声发射技术、传感器与检测技术和数控技术等领域的研究。

肖定国 1959 年生,1984 年获北京理工大学硕士学位,副教授。主要从事超声测量技术、传感器技术、检测自动化技术和数控技术等领域的研究。

黄 卉 2002 年获北京理工大学硕士学位。主要从事无损检测、超声测量技术领域的研究。

理 华 2002 年获北京理工大学硕士学位。主要从事无损检测、超声测量技术领域的研究。