

线膛火炮内膛疵病图像分类研究

雷洁 傅建平 张培林

(军械工程学院一系, 河北 石家庄 050003)

摘要 随着火炮实弹射击发数的增加,身管内膛由于不断遭受高温、高压火药气体和弹丸的摩擦作用而产生多种疵病,影响射击精度和射击安全性。分析了内膛压痕、锈蚀和烧蚀等疵病边缘梯度和边缘方向上的特点,将疵病图像分为遍布性疵病和区域性疵病两大类;根据图像 Radon 变换对方向的敏感性和 Susan 边缘检测算子便于提取含有梯度信息的边缘特点,定义了遍布性疵病和区域性疵病的分类因子,为后期疵病特征提取和识别提供了依据。实验证明,该算法能有效地对两类内膛疵病进行区分和计算,并且识别准确率高,从而实现了内膛疵病图像的定量预分类。

关键词 图像处理;区域性疵病;遍布性疵病;图像变换;分类因子

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.121002

Research on Flaw Classification of Rifle Cannon Bore Image

Lei Jie Fu Jianping Zhang Peilin

(The First Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China)

Abstract With the increase of ball firing times, multiple flaws will appear in the gun bore, due to the impact of high temperature-high pressure powder gas and the attrition of pills, which influences the fire accuracy and the fire safety. Through analyzing the gradient and direction characteristics of indentation, rust corrosion and burning corrosion, the gun bore flaw images are separated into spread flaw images and regional flaw images. Then the classification factor of the spread flaw image and the regional flaw image is defined according to the sensitivity to direction of Radon image transformation and the edge gradient of Susan operation. This classification offers basis for the following analysis. Experimental results show that the algorithm could classify the gun bore flaw image accurately through computing the flaw characteristics and thus realize the quantitative classification.

Key words image processing; regional flaw; spread flaw; image transformation; classification factor

OCIS codes 100.2000; 110.4155; 280.4750

1 引言

射击时,火炮内膛承受高温、高压火药气体的物理与化学作用以及高速弹丸的机械作用,工作条件极为复杂,长期使用后,其内膛结构的形状、尺寸逐渐受到磨损及破坏,会出现烧蚀、磨损、裂纹、阳线断裂、严重挂铜与锈蚀等不同种类的内膛疵病^[1]。射击前要求检查内膛质量,并进行评估。在通常情况下,锈蚀、阳线断裂、压痕、挂铜、裂纹等主要集中分布于火炮内膛某一区域,而烧蚀、冲刷等则在火炮内膛内广泛分布。根据疵病表征特征的不同,其分割识别方法也不同。因此,必须分析火炮内膛不同疵病间的共同特点,进行内膛图像的预分类,为后续缺陷分割与分析做准备。本文应用图像 Radon 变换原理,结合两类疵病的表现形式,提出了分类指标,为下一步分割方法的选取提供了依据。该方法随机噪声影响小,通用性好,分类精度高,便于工程应用。

收稿日期: 2011-06-21; **收到修改稿日期**: 2011-09-02; **网络出版日期**: 2011-10-25

基金项目: 军队科研项目([2009]246)资助课题。

作者简介: 雷洁(1989—),男,硕士研究生,主要从事车辆检测、图像处理等方面的研究。E-mail: 1989leijie@sina.com

导师简介: 傅建平(1966—),男,副教授,硕士生导师,主要从事身管检测、自动化控制等方面的研究。

E-mail: jx_fu_jp@sina.com

2 火炮内膛疵病特征分析

图1为火炮内膛疵病图像,其中图1(a)的阳线上存在压痕,图1(b)的膛线两侧存在区域性的锈蚀现象,图1(c)存在遍布性的烧蚀。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,则烧蚀的程度就越严重^[2,3];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、面积越大,则说明压痕和锈蚀程度越严重^[4]。而从疵病边缘方向长度来看,烧蚀的边缘在各个方向都是均等的,表现为各向同性;锈蚀的边缘则主要沿膛线方向,表现为各向异性;压痕边缘较少,在存在膛线的情况下也表现为各向异性。而且,通过其他疵病图像分析可以发现,阳线断裂、挂铜、裂痕等含有与锈蚀相同的疵病特征,而冲刷和阳线磨损的疵病则与烧蚀相同。因此,可以依据疵病的分布方式把锈蚀、阳线断裂、压痕、挂铜、裂痕等看作区域性疵病,而把烧蚀、冲刷和阳线磨损看作遍布性疵病,边缘方向以及边缘的过渡宽度大小可以作为其分类特征。



图1 火炮内膛图像
Fig.1 Gun bore image

3 火炮内膛疵病分类因子

由以上分析可以看出,区域性疵病的边缘图像存在各向异性现象,而遍布性疵病的边缘则表现出各向同性^[5]。为了对火炮内膛图像进行大的分类,以确定后期识别方法,需提取出含有一定梯度信息的疵病边缘,并能定量地反映出它们沿各个方向的不同。

3.1 图像的 Radon 变换

Radon 变换是一种坐标变换,如图2所示。坐标系 $x-o-y$ 绕原点逆时针旋转 θ 角得到 $x'-o-y'$ 坐标系,将火炮内膛图像 $f(x,y)$ 在任意一角度 θ 上按平行于 y' 轴

的线积分^[6],即

$$R_{\theta}(x') = \int_{-\infty}^{\infty} f(x' \cos \theta - y' \sin \theta, x' \sin \theta + y' \cos \theta) dy',$$

式中

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}. \quad (2)$$

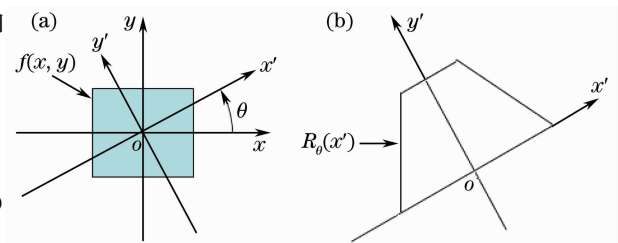


图2 Radon 变换的几何关系

Fig.2 Geometrical relationship of Radon transformation

Radon 变换具有较强的几何意义,图像 $f(x,y)$ 的 Radon 变换为图像在 x' 轴上的积分,即 $R_{\theta}(x')$ 的值为在过 x' 位置且垂直于 x' 轴的直线上的所有像素点值的累加和。

对于不含疵病的线膛火炮内膛图像,膛线交界线的 Radon 变换值为交界线在 x' 轴上投影的所有点的值的累加和,因而在任意角度 θ 方向,其 Radon 变换值 $R_{\theta}(x')$ 会出现峰值,而在其他方向则迅速衰减;并且当 θ 为膛线缠角时, Radon 变换值 $R_{\theta}(x')$ 最大,即

$$\alpha_m = \theta(\forall R_{\theta} = \max[R_{\theta}(x')]). \quad (3)$$

3.2 Susan 边缘检测

Susan 检测是基于图像的几何观测,将像素分为边缘、角点和扁平区三类,直接利用图像的灰度特征进

行检测,其原理如图 3 所示。图像的每个像素代表一个圆形模板的核,模板被分成独立的两个区域,即与模板中心核有相似灰度值的像素构成的核值相似区(USAN)和它的补。USAN 区域含有图像在某个局部区域的结构信息,同值核的大小反映了图像局部特征的强度^[7]。当圆形模板完全处在背景或目标中时,USAN 区域面积最大;而当模板移向目标边缘时,USAN 区域面积逐渐变小。当模板中心处于角点时,USAN 区域面积达到局部最小,位于图像上局部最小的 USAN 区的核像素就是图像的角点。因此,Susan 原则的基础就是判断核子邻域中相似灰度像素的比例。

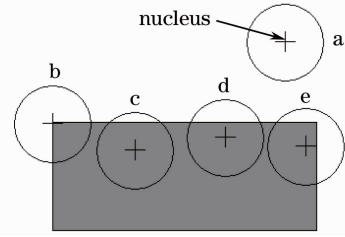


图 3 Susan 准则原理

Fig. 3 Schematic diagram of Susan rule

具体检测时,用圆形模板扫描整个图像,比较模板内每一个像素与中心像素的灰度值,并给定阈值来判断该像素是否属于 USAN 区域^[8]:

$$c(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) = \begin{cases} 1 & \text{if } |I(\mathbf{r}) - I(\mathbf{r}_0)| \leq t \\ 0 & \text{if } |I(\mathbf{r}) - I(\mathbf{r}_0)| > t \end{cases} \quad (4)$$

式中 t 为亮度差门限,表示所检测特征的最小对比度,也是能忽略的噪声的最大容限,并决定了提取特征量的多少, t 值小则特征多, t 值大则特征少。图像中某一点的 USAN 区域大小可表示为

$$n(\mathbf{r}_0) = \sum_{\mathbf{r} \neq \mathbf{r}_0} c(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0). \quad (5)$$

用模板扫描整个图像得到每个像素的 USAN 区域后,再由公式

$$R(\mathbf{r}_0) = \begin{cases} g - n(\mathbf{r}_0) & n(\mathbf{r}_0) < g \\ 0 & n(\mathbf{r}_0) \geq g \end{cases} \quad (6)$$

产生 USAN 的特征图像。式中 g 为几何门限,提取边缘时,一般取 $3n_{\max}/4$, n_{\max} 是 $n(\mathbf{r})$ 所能达到的最大值。 g 的大小不仅决定了所得边缘点的尖锐程度,也决定了它能从 USAN 区域响应矩阵中提取特征的多少, g 越小,所得的特征点越尖锐。

对于火炮内膛疵病图像来说,只要选取合适的 g 、 t 值,就能提取出区域性疵病的过渡边缘^[9];而提取的遍布性疵病的边缘图像亦能反映出边缘处的梯度信息。

3.3 疵病分类因子

通过对疵病图像进行 Susan 边缘提取和 Radon 变换,可以得到一幅反映图像边缘方向特征和过渡边缘宽度信息的边缘二值图像^[10]。前面已经说明,区域性疵病图像的边缘表现为各向异性,而遍布性疵病的边缘表现为各向同性。可以把区域性疵病的膛线边界平移,令所有的炮管膛线边界中心重合为一个矩形区 S ,其长轴长度为 L ,短轴长度为 W ,由于疵病边缘的存在,则长轴方向在 γ (膛线缠角)方向上有 δ 的偏移, $\delta = \arctan(W/L)$ 反映了疵病影响程度;而把遍布性疵病的边缘等价为一个半径为 R 的圆形区域 S_R ,其面积可以反映遍布性疵病的影响程度。

为了突出两类疵病的各向异性和各向同性,对矩形图像和圆形图像 Radon 变换后的参数平方和后取积分,即

$$P(\theta, b) = \int_{-\infty}^{\infty} M(\theta, S)^2 d(x), \quad (7)$$

式中 S 为边缘平移结果, $M(\theta, S)$ 为其 Radon 变换结果。由图像 Radon 变换的性质可知,矩形区域计算后为一单峰曲线,而圆形区域为一曲线。用公式表示为

$$P(\theta, S) = \begin{cases} L^2 W / \cos \alpha - L^3 \sin \alpha / (3 \cos^2 \alpha) & \alpha \leq \delta \\ W^2 L / \sin \alpha - W^3 \sin \alpha / (3 \sin^2 \alpha) & \alpha > \delta \end{cases} \quad (8)$$

$$P(\theta, S_R) = 16R^3/3, \quad (9)$$

式中 α 为变换角度相对于膛线缠角 γ 的偏移量。

由于火炮内膛通常存在两类以上的疵病,对任意一幅火炮内膛疵病图像,其 Susan 边缘图像的变换结果应为(8)、(9)式的和,即

$$P(\theta, b) = P(\theta, S) + P(\theta, S_R), \quad (10)$$

式中 $P(\theta, b)$ 为疵病的综合评价函数, $P(\theta, S)$ 为区域性疵病的影响函数, $P(\theta, S_R)$ 为遍布性疵病的影响函数。

根据以上分析可知,任意一幅内膛图像按(7)式变换后的曲线反映了疵病的综合特征,因此,定义分类因子 η 为

$$\eta = T \tan \delta, \quad (11)$$

式中 T 反映了遍布性疵病,应为与图像大小无关的量,取 $T = R/A$,其中 A 为图像的面积。

通过对不同 γ 值计算变换曲线发现,矩形图像按(7)式变换后的最大最小差值为一仅与 δ 有关的单调曲线,如图 4 所示。因此,可以通过对火炮内膛图像变换曲线进行拟合来求取不同疵病图像的 δ 值。进而求出内膛图像的区域性疵病的矩形等效长轴长度 L 、短轴长度 W 以及其影响程度曲线。而二者之差即为遍布性疵病影响程度曲线。

3.4 分类因子计算流程

根据以上分析,可以通过如下过程计算疵病分类因子:

- 1) 利用 Susan 边缘检测原理检测含梯度信息的火炮内膛图像边缘 $b(x, y)$;
- 2) 根据图像 Radon 变换原理和(7)式计算内膛图像疵病评价曲线;
- 3) 通过拟合图得到区域性疵病偏移角 δ ,进而得到区域性疵病影响曲线;
- 4) 利用(10)式求得遍布性疵病影响曲线;
- 5) 根据(9)式求得 T 值,进而按(11)式得出疵病分类因子。

4 实验分析

按照分类因子计算流程,对图 1 中三幅内膛图像进行了疵病分类,得到的变换曲线如图 5 所示,图中 P_b 为综合评价曲线, P_h 为区域性疵病影响曲线, P_T 为遍布性疵病影响曲线。图 5(a)中, P_b 、 P_h 峰值部分都很尖锐,说明区域性疵病很小;而 P_T 均值较小,说明遍布性疵病很小。图 5(b)中, P_h 峰值明显减缓,而 P_T 均值亦有所增大,说明区域性疵病影响程度较大,并有少量的遍布性疵病。图 5(c)中, P_b 、 P_h 没有明显波峰,而且 P_T 紧贴 P_b ,说明疵病主要是遍布性疵病。根据(11)式得出以上内膛图的疵病分类因子,如表 1 所示。从表 1 可以看出,压痕和锈蚀所得的 η 值比较接近,而与烧蚀相差 3 个数量级。若以 10^{-2} 作为两类疵病的分类界限,则压痕和锈蚀为区域性疵病,烧蚀则为遍布性疵病,这也同上文分析结果相同。同时,3 个数量级的差值保证了分类的准确性,因此,完全可以把分类因子 η 作为区分区域性疵病和遍布性疵病的分类标准。

表 1 分类因子计算结果

Table 1 Computing results of classification factor

	$\delta / (^{\circ})$	T	η
Fig. 5(a)	0.1432	0.0026	5.85×10^{-5}
Fig. 5(b)	2.3720	0.0068	28.15×10^{-5}
Fig. 5(c)	95.8329	0.1244	0.2081

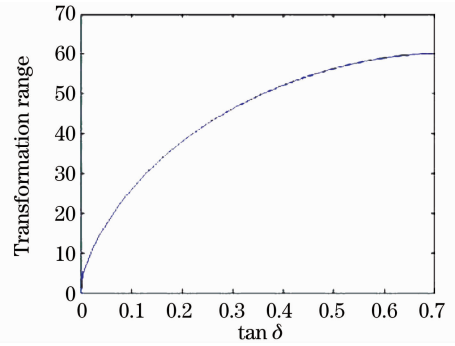


图 4 变换极差与 $\tan \delta$ 关系曲线

Fig. 4 Relation between transformation range and $\tan \delta$

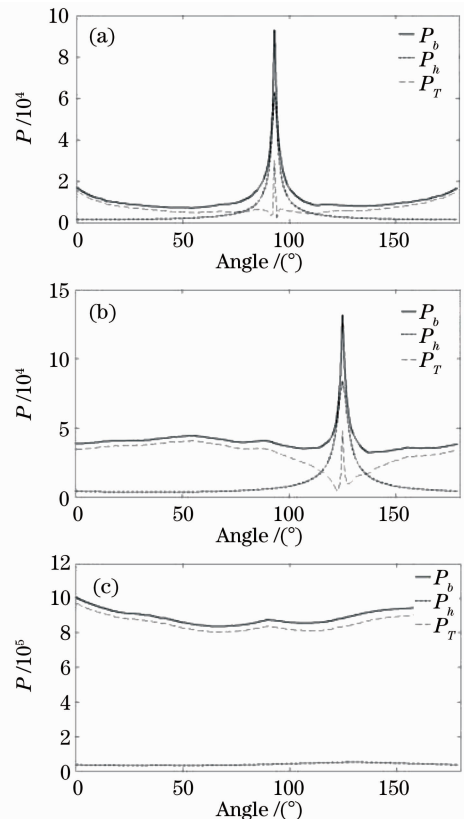


图 5 内膛疵病图像变换曲线

Fig. 5 Transformation curves of bore flaw images

5 结 论

火炮射击后,身管内膛会出现烧蚀、磨损、裂纹、阳线断裂、严重挂铜与锈蚀等不同种类的疵病。长期以来都是通过其颜色及纹理特点由专家进行分类。本文根据各种疵病的边缘分布共性,把疵病分为区域性疵病和遍布性疵病两大类,并结合 Radon 变换原理对两类疵病进行了定量分类,计算结果表明了该方法的有效性。但本文方法对于区域性疵病计算时需要内膛缠角的先验知识,还有待改进。

参 考 文 献

- 1 Song Weidong, Zhang Jinzhong. The expressive model of the characteristic value of the gun bore erosion and wear[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2002, **16**(suppl.): 515~518
宋卫东, 张进忠. 火炮身管内膛烧蚀磨损特征量表述模型[J]. *测试技术学报*, 2002, **16**(suppl.): 515~518
- 2 Yao Shunchun, Lu Jidong, Lu Zhimin *et al.*. Influence of sample morphology on laser ablation properties of coal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1126~1130
姚顺春, 陆继东, 卢志民 等. 样品形态对燃煤的激光烧蚀特性影响分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 1126~1130
- 3 Wu Lixiong, Ye Xisheng, Liu Zejin. Investigation on infrared continuous-wave laser damage mechanism of polyurethane-based black paint[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0302002
吴丽雄, 叶锡生, 刘泽金. 聚氨酯黑漆的红外激光损伤机理研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0302002
- 4 Liu Yixin, Wang Guiyu. Determination of muzzle velocity loss by law of bore wear[J]. *Acta Armamentarii*, 2007, **28**(1): 7~9
刘怡昕, 王桂玉. 由炮膛磨损规律确定火炮初速减退量[J]. *兵工学报*, 2007, **28**(1): 7~9
- 5 Hu Haitao, Ping Ziliang, Wu Bin. Quick algorithm of image moments with rotational invariance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 394~398
胡海涛, 平子良, 吴斌. 具有旋转不变性的图像矩的快速算法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 394~398
- 6 Qin Xiangpei. The Treasury of MATLAB in Image Processing and Interface Programming[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009
秦襄培. MATLAB 图像处理与界面编程宝典[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009
- 7 Zhang Hanling. Application of the MATLAB in the Image Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008
张汗灵. MATLAB 在图像处理中的应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008
- 8 Luo Zhongliang. Image edge detection algorithm based on improved SUSAN operator[J]. *Journal of Chongqing Institute of Technology*, 2009, **23**(5): 102~105
罗忠亮. 基于改进 SUSAN 算子的图像边缘检测算法[J]. *重庆工学院学报*, 2009, **23**(5): 102~105
- 9 Li Xiaofeng, Xu Jun, Zhang Shengxiu *et al.*. Edge detection algorithm of laser active imaging[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1599~1601
李晓峰, 徐军, 张胜修 等. 激光主动成像图像边缘检测方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1599~1601
- 10 Zhao Lei, Yu Xin, Chen Yinan *et al.*. Object detection method based on generalized likelihood ratio tests in photon images [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 91~96
赵磊, 俞信, 陈翼男 等. 光子图像中基于广义似然比检验的目标探测方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 91~96