

# 基于机器视觉的某种弹弹体硬度检测技术研究

王丽<sup>1</sup>, 李艳飞<sup>2</sup>, 郭秋萍<sup>3</sup>, 任建荣<sup>2</sup>, 崔瀚<sup>1</sup>

(1.沈阳工学院, 辽宁 抚顺 113122; 2.辽沈工业集团有限公司, 沈阳 110045;

3.驻沈阳地区第二军事代表室, 沈阳 110043)

**摘要:** **目的** 解决某种弹弹体硬度检测过程中人工读取硬度圆直径存在的问题。**方法** 应用材料的布氏硬度检测原理, 设计基于机器视觉的某种弹弹体硬度检测装置, 并制定某种弹弹体硬度的视觉检测算法。根据所提出的算法应用 Maltlab 实现对某种弹弹体硬度圆特征的提取和直径的计算。**结果** 通过 *T* 检验法对所提出的机器视觉检验方法与人工检测的结果进行对比分析, 其结果为 2 种检测结果无差异性。**结论** 本文所设计的机器视觉检测装置和提出的视觉检测算法的具有较高的可靠性和正确性, 可以应用于某种弹弹体的硬度检测。

**关键词:** 机器视觉; 弹体; 硬度; 检测

**中图分类号:** TJ410.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)11-0277-07

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.11.032

## Certain Ammunition Body Hardness Testing Technology Based on Machine Vision

WANG Li<sup>1</sup>, LI Yan-fei<sup>2</sup>, GUO Qiu-ping<sup>3</sup>, REN Jian-rong<sup>2</sup>, CUI Han<sup>1</sup>

(1. Shenyang Institute of Technology, Liaoning Fushun 113122, China; 2. Liaoshen Industries Group Co., Ltd., Shenyang 110045, China; 3. The Second Military Representative Office of the Army Equipment Department in Shenyang, Shenyang 110043, China)

**ABSTRACT:** The work aims to solve the problem in manual reading of the hardness circle diameter in the hardness testing of the Certain ammunition body. A hardness testing device for the Certain ammunition body based on machine vision was designed by applying the material Brinell hardness testing principle, and a visual testing algorithm for the hardness of the Certain ammunition body was developed. According to the algorithm proposed, Maltlab was used to realize the extraction of the characteristics of the hardness circle of the Certain ammunition body and the calculation of the diameter. Finally, the results of the proposed testing method based on machine vision and the manual testing were compared and analyzed by T-test method, indicating that there was no difference between the two testing results. The designed testing device based on machine vision and the proposed visual testing algorithm have high reliability and accuracy, and can be applied to the hardness testing of the Certain ammunition body.

**KEY WORDS:** machine vision; Certain ammunition body; hardness; testing

在某种弹弹体的生产过程中涉及许多生产工序, 而在这些生产工序中的检验环节包括外观尺寸和理

化性能检验<sup>[1]</sup>, 并且某种弹弹体需要 100%检验。某种弹弹体在加工成型后要对其弹体强度进行检验预

收稿日期: 2022-10-17

基金项目: 辽宁省教育厅科学研究一般项目 (L202009)

作者简介: 王丽 (1979—), 女, 硕士。

判,其原因是弹体强度不但会影响某种弹使用时的安全性<sup>[2]</sup>和可靠性,同时对其勤务处理方面也有极其重要的影响。目前,生产企业对某种弹弹体的强度检验依据标准为布氏硬度印痕检测法,即根据一定范围内硬度与强度之间呈现的正比例关系对某种弹弹体强度进行检验合格性判断。生产过程中通过人工读取硬度圆直径的方法进行某种弹弹体硬度值的测量,采用的读数工具为读数显微镜,而这种采用人工操作方法一方面存在读数误差,另一方面降低了工作效率<sup>[3]</sup>,进而可能导致安全风险和影响企业经济效益。因此,采用一种新的硬度检测方法替代传统人工检测,以提高某种弹弹体硬度检测工序的效率和数据准确性。

随着视觉检测技术的发展,基于机器视觉的在线检测技术在车牌识别、材料和成品的缺陷检测、产品外观尺寸测量以及材料硬度检测<sup>[3-11]</sup>等方面都得到了广泛应用。因此,为了解决在硬度检测过程中由于人工读数存在的缺点可能导致的问题,本文提出基于机器视觉进行某种弹弹体检测的方法。通过机器视觉自动获取图像并进行数字图像处理,从而实现对某种弹弹体硬度的自动检测和硬度值计算。

## 1 检测方法和装置

### 1.1 硬度检测原理

布氏硬度对硬度检测是一种可靠性较高的方法,因此在企业生产检验时对硬度的衡量普遍采用布氏硬度值。布氏硬度的测量原理是将一定直径的合金钢质圆球施加一定的试验力,并保持一定时间后,在被测物表面留下压痕直径,然后测量压痕留下的直径,原理公式见式(1)<sup>[3,12]</sup>。

$$H = 0.102 \times \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

式中:  $F$  为作用载荷;  $D$  为合金钢质球直径;  $d$  为检测件上的压痕直径。

### 1.2 测试方法

由于某种弹弹体是回转体,而根据布氏硬度的测量原理其只能在平面进行测试。所以为了解决回转体为非平面的问题,在对某种弹弹体进行加载作用力之前要对弹体打磨平面。打磨平面的大小与打磨装置接触弹体后的下降距离相关,根据某种弹所用材料的硬度圆测试合格的最大直径为 3.4 mm,并且由于砂轮的宽度远远大于 3.4 mm,所以在打磨平面时不需要有轴向运动,仅需要在径向下下降。因此,根据图 1 进行最小下降距离的计算,计算时  $H$  取 3.4 mm,则砂轮沿着弹体表面径向下下降距离  $h$  的值应取值为:

$$h \geq R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{3.4}{2}\right)^2} \quad (2)$$

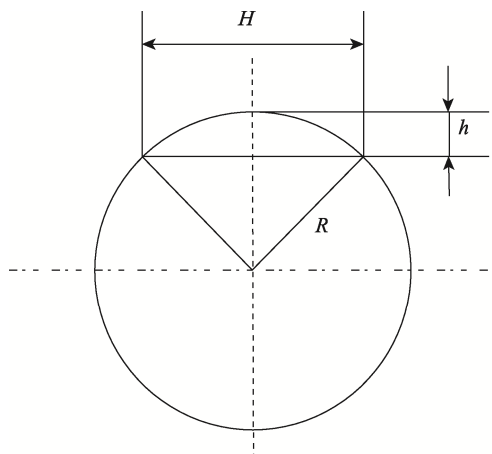


图1 某种弹弹体打磨平面示意图  
Fig.1 Schematic diagram of grinding plane of Certain ammunition body

式中:  $R$  为某种弹的圆柱部半径,但是为了保证压头压弹体印痕成型的可靠性,一般  $h$  的取值会在误差允许内尽量大些(根据弹丸口径确定)。在完成某种弹弹体的打磨后对打磨平面进行压痕,最后通过基于机器视觉的硬度印痕检测系统检测某种弹弹体的硬度。

### 1.3 某种弹硬度检测装置

根据布氏硬度检测的原理以及考虑与原有某种弹生产工位的匹配,某种弹布氏硬度检测装置应具有打磨弹体、压痕装置、压痕图像采集、图像识别与判定等功能,且在对某种弹弹体打磨之前采用如图 2 所示的弹体夹紧定位装置将弹体固定,以保证打磨过程中弹体不会有转动。上述的压痕图像采集由工业 CCD 摄像机完成,并且为了保证采集效果在摄像机前加装了双远心镜头和环形光源,如图 3 所示。压痕的识别和判定主要由计算机图像处理系统完成,上述 2 部分组成了硬度印痕检测系统。在检测装置设计过程中遵循的设计依据为 GB/T 231.1—2018、GB/T 231.2—2012 以及 JJG 150—2005,最终所设计的基于机器视觉的某种弹硬度检测装置三维结构如图 4 所示。

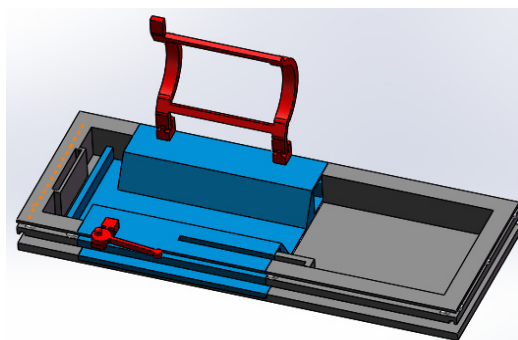


图2 某种弹弹体夹紧定位装置  
Fig.2 Clamping and positioning device for Certain ammunition body

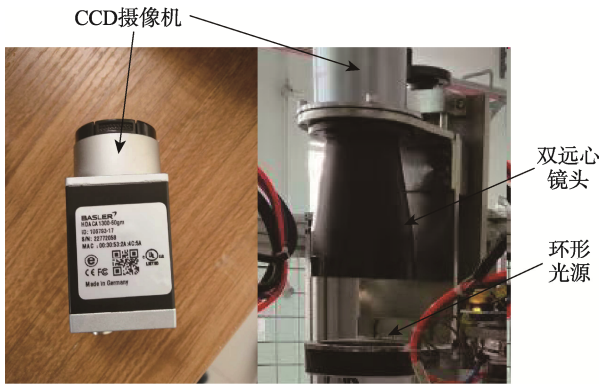


图 3 压痕图像采集系统  
Fig.3 Indentation image acquisition system

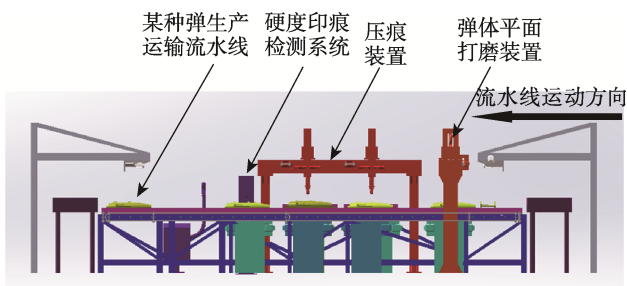


图 4 某种弹硬度检测装置三维结构  
Fig.4 Three-dimensional structure of  
Certain ammunition hardness testing device

## 2 检测算法

采用机器视觉检测某种弹体硬度的精度与图像的获取质量息息相关。由于某种弹的生产车间环境复杂且在打磨过程中也会留有一定的打磨痕迹, 这些必然会增加获取图像的噪声。因此为了得到与实际相符的弹体硬度圆, 结合生产现场实际的工作情况和文献[13]对图像的处理方法, 得出本文制定的图像处理流程如图 5 所示。图像处理软件选用 Matlab。

### 2.1 图像滤波

在对图像进行简单预处理即由 RGB 图像转换为灰度图像后, 需要对图像进行去噪, 以获得有用信息更加明显的图像。对图像的去噪处理一般采用滤波的方法, 但是由于噪声的形式是未知的, 所以需要将多种滤波方法结合使用。根据图像处理所要提取硬度圆痕迹这一目标, 首先采用中值滤波, 其原

因是这种滤波输出值为像素点邻域灰度级的中间值, 进而能够将孤立的噪声点去除, 滤波后的效果如图 6b 所示。其次为了进一步去除图像噪声, 在中值滤波的基础上应用空间域滤波处理图像, 采用的模板为  $[1 \ 1 \ 1; 1 \ 1 \ 1; 1 \ 1 \ 1]/8$ , 这种滤波方法能够在去除噪声的同时增强图像中剩余部分的细节, 使图像的有效信息得到大幅度优化, 滤波后的效果如图 6c 所示。由于中值滤波和空间域滤波的效果有限, 所以采用滤波效果较好的自适应滤波对图像噪声进行最后的去噪。自适应滤波以图像的局部矩阵和方差对图像进行处理后的结果进行输出。局部矩阵和方差分别由式 (3) 和式 (4) 估算,  $\eta$  为图像中像素的  $M \times N$  的邻域<sup>[14]</sup>; 然后应用式 (5) 估算灰度值, 其中式 (5) 中的  $\sigma^2$  为噪声的方差, 图像处理时  $n_1$  和  $n_2$  分别取 8 和 7。经过上述运算能够有效消除局部噪声, 最终的滤波效果如图 6d 所示。

$$\mu = \frac{1}{MN} \sum_{\eta_1, \eta_2 \in \eta} a(n_1, n_2) \quad (3)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{MN} \sum_{\eta_1, \eta_2 \in \eta} a(n_1, n_2) - \mu^2 \quad (4)$$

$$b(n_1, n_2) = \mu + \frac{\sigma^2 - \nu^2}{\sigma^2} [a(n_1, n_2) - \mu] \quad (5)$$

在图 6 中对滤波效果的判断主要通过“Canny”算子边缘检测结果来验证。该算子在边缘检测时寻找的是图像梯度的极大值, 这里的梯度是图像对应二维函数的一阶导数, 表达式为:

$$G(x, y) = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (6)$$

梯度的极大值采用由  $G_x$  和  $G_y$  为参数的范数表达, 梯度的方向则表示为:

$$k(x, y) = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (7)$$

边缘检测时通过式 (6) 和式 (7) 对梯度的极大值和方向计算后, 采用非极大值一致的方法找到局部极大值点, 并将其他值置零以细化边缘, 对应的检测原理如图 7 所示。同时采用 2 个阈值  $T_1$  和  $T_2$  对边缘进行识别和链接, 其中  $T_1$  用来识别边缘,  $T_2$  用来链接断边, 从而能够得到连续的边缘。由图 6 可以明显看出, 经过滤波后噪声明显减少, 且滤波的效果随着滤波方法的使用逐渐提升, 最终结果验证了本文提出滤波流程的准确性。

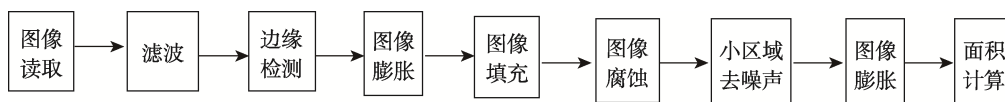


图 5 某种弹体硬度检测的图像处理流程  
Fig.5 Image processing flowchart of Certain ammunition body hardness testing

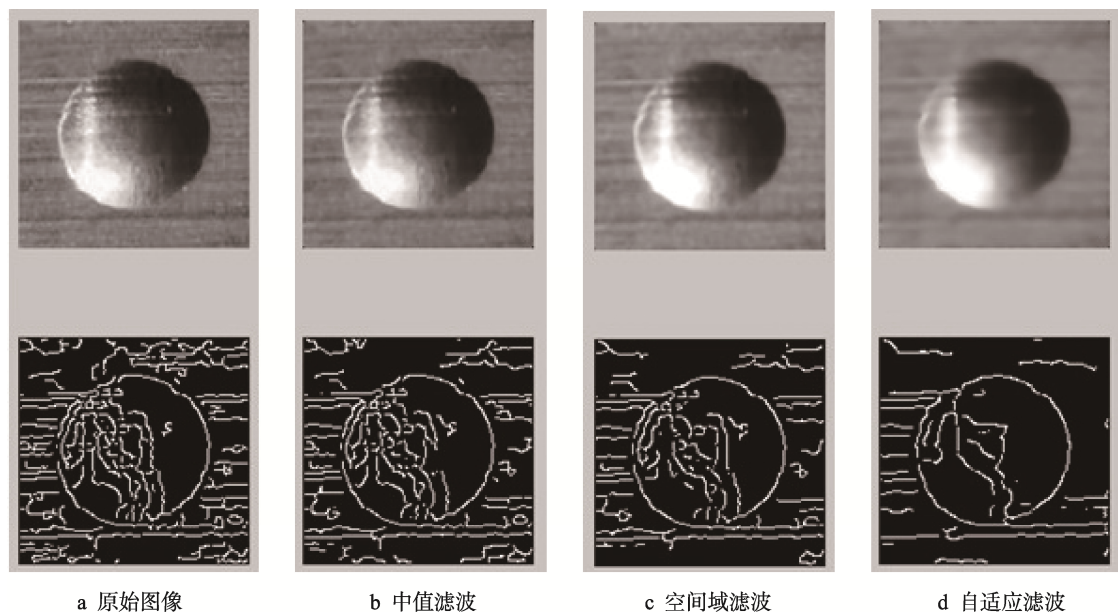


图6 图像滤波处理效果  
Fig.6 Image filtering processing effect

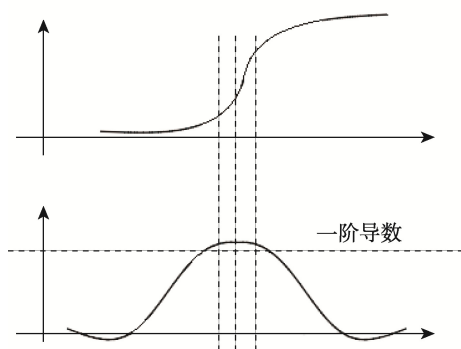


图7 一阶导数边缘检测原理  
Fig.7 First derivative edge testing principle

## 2.2 硬度圆特征提取

从图6滤波后的结果可以看出,尽管硬度圆以外的无用信息相对于原始图像已经大幅度减少,但是要单独获得硬度圆的特征还需要进行图像形态学处理。

由图6d中最后滤波的边缘检测结果可以看出,硬度圆的边缘仍然存在些许断点,因此先进行图像膨胀使硬度圆的边缘变长变粗,从而将硬度圆封闭。在图像膨胀过程中如果 $A$ 被 $B$ 膨胀,则表示为 $A \oplus B = \{z | (B)_z \cap A \neq \emptyset\}$ ,这里 $B$ 为结构元素。在对某种弹体硬度圆识别处理过程中采用了2种结构元素,分别是正方形结构和圆盘结构。在Matlab中的`strel`函数用于定义结构元素和像素值,硬度圆采用了`strel('square',1)`创建 $1 \times 1$ 像素的正方形结构和`strel('disk',1)`创建半径为1的圆盘形结构对图像中的

边缘进行膨胀,膨胀后的结果如图8a所示。从图8a中明显的看出边缘线的变粗和断点的消失。

图像膨胀后需要对无用的边线信息进行腐蚀,这种操作称为闭操作<sup>[15]</sup>。为了进一步保证硬度圆的完整性,在腐蚀前需要对封闭的边缘进行图像填充,这样在腐蚀操作时能够将填充区域较大的部分保留,而无法实现填充的边缘区域就会被腐蚀消失。图像填充采用`imfill`函数,所选参数为'holes',填充后的图像如图8b所示。由图8b中的填充结果可以看出,除了硬度圆被填充满其余边线均保持原样。腐蚀操作采用对边线进行收缩的方法消除边线。在图像腐蚀过程中,如果 $A$ 被 $B$ 腐蚀,则表示为 $A \ominus B = \{z | (B)_z \cap A^c \neq \emptyset\}$ ,这里 $A^c$ 为 $A$ 的补, $B$ 同样为结构元素。腐蚀采用`strel('diamond',1)`创建菱形结构腐蚀边线,Matlab提供了`imerode`函数进行腐蚀操作且由于膨胀过程中采用了2种膨胀,因此进行2次腐蚀,程序代码如下:

```
BWfs1=imerode(BWtc,SEfs);%对图像第1次腐蚀
```

```
BWfs2=imerode(BWfs1,SEfs);%对图像第2次腐蚀
```

腐蚀后的图像如图8c所示。从图像处理结果可以看出,尽管已经提取了大部分硬度圆,但是在图像的边界处仍有微小的小斑点,如图8c中圈出区域。因此需要对硬度圆外的小斑点进行清除,其方法为首先通过`size`函数读取原始灰度图像的图像矩阵,然后定义图像中面积的最大、最小值分别为`maxim=dim(1)*dim(2)`和`minim=round(maxim/8)`,最后使用`bwareaopen`函数删除图像中面积小于`minim`的区域对象。图像处理结果如图8d所示,代码如下:

```
BWqc=bwareaopen(BWfs2,minim);%去除小区域面积。
```

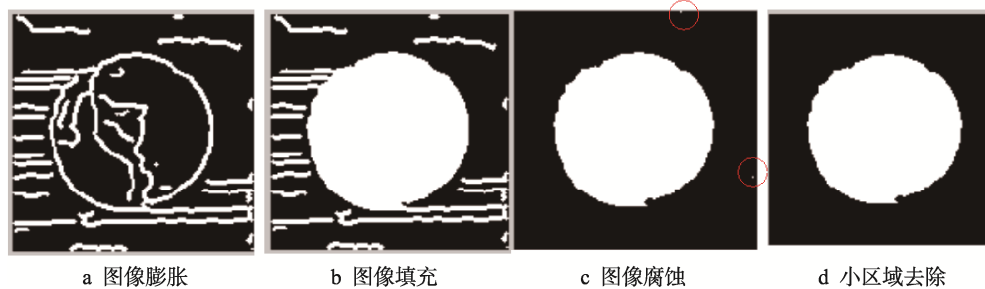


图 8 硬度圆特性提取  
Fig.8 Extra

2.3 硬度圆直径计算

由于原始图像硬度圆的边缘受打磨平面时所留下痕迹的影响，其边缘并不是十分光滑，所以最后经过图像处理的硬度圆并不是理想的圆形，不宜直接采用拟合圆边缘计算硬度圆直径的办法进行结果计算。但是根据布氏硬度测试和力学平衡原理可以应用面积等效的方法将识别出的硬度圆面积等效为等面积的圆形；然后再求取硬度圆直径作为最终的测量结果，其中图像中识别出的填充区域面积应用 bwarea 函数进行计算；最后应用圆面积计算公式求得硬度圆直径。程序代码如下：

```
area=bwarea(BWqc);%识别出的图像面积计算；  
d=2*sqrt(area/pi);%计算圆的直径。
```

因为计算出的硬度圆直径的结果为像素值，并不是硬度圆的物理直径，所以需要进行像素值与实际直径物理值转换关系的标定。标定过程中使用特制的直径为 1 mm 的标准圆形样块，如图 9 所示。标定时通过计算标准样块的实际面积  $S$  与识别出的像素面积  $S^l$  的比值，推算出样块实际直径与图像中圆直径的比例参数  $k$ ，然后用  $k \times d$  即为实际测得的硬度圆直径。

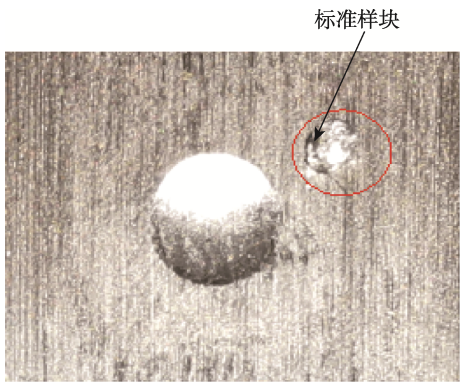


图 9 标准样块标定  
Fig.9 Calibration diagram of  
standard block

3 实验验证

为了验证所采用算法的准确性，在生产现场随机抽取 10 发某型号的某种弹产品进行硬度测试，所得

数据与现场人工测量得到的结果进行对比。其中人工测量数据为工人处于精神饱满状态下测得的，以保证数据的准确性，测量后的对比结果如表 1 所示。由表 1 可以看出 2 组检测数据的绝对差值区间为 0.03~0.16, 因此为了进一步判断机器视觉测量数据的可靠性，需要对 2 组数据是否存在显著性差异进行分析。

表 1 某种弹弹体硬度机器视觉和人工检测数据  
Tab.1 Test data of a certain type of Certain  
tion body based on machine vision and manual testing

| 弹体编号 | 机器视觉检测结果/mm | 人工检测结果/mm |
|------|-------------|-----------|
| 1    | 3.05        | 3.02      |
| 2    | 3.31        | 3.21      |
| 3    | 3.17        | 3.2       |
| 4    | 3.22        | 3.11      |
| 5    | 2.99        | 3.16      |
| 6    | 3.33        | 3.24      |
| 7    | 3.15        | 3.02      |
| 8    | 3.25        | 3.09      |
| 9    | 3.38        | 3.26      |
| 10   | 3.19        | 3.23      |

假设 2 组参数的测量结果是服从正态分布的独立样本，应用独立样本  $T$  检验法对 2 组数据是否存在显著性差异进行统计分析。当样本方差相等和不等时  $T$  统计量分别定义为式（8）和式（9）。

$$T = \frac{\bar{X} - \bar{Y} - (\mu_x - \mu_y)}{S_w \sqrt{\frac{1}{n_x} + \frac{1}{n_y}}} \tag{8}$$

$$T = \frac{x - y - (\mu_x - \mu_y)}{\sqrt{\frac{S_x^2}{n_x} + \frac{S_y^2}{n_y}}} \tag{9}$$

式中： $\bar{y}$ 、 $\bar{x}$ 、 $\mu_x$ 、 $\mu_y$  分别为样本平均值和总体均值； $S_x^2$ 、 $S_y^2$ 、 $n_x$ 、 $n_y$  分别为样本方差和样本数量。

$$S_w = \frac{(n_x - 1)S_x^2 + (n_y - 1)S_y^2}{n_x + n_y - 2} \tag{10}$$

对表 1 中数据进行分析，得出结果如表 2 所示。

表 2 独立样本  $T$  统计量结果  
Tab.2 Statistical results of independent sample  $T$

| 假设    | 方差方程的 Levene 检验 |       | 均值方程 $T$ 检验 |        |              |      |          |  | 差分的 95%置信区间 |          |
|-------|-----------------|-------|-------------|--------|--------------|------|----------|--|-------------|----------|
|       | $F$             | Sig 值 | $T$         | df 值   | Sig ( 双侧 ) 值 | 均值差值 | 标准误差值    |  | 下限          | 上限       |
| 方差相等  | 0.522           | 0.479 | 1.045       | 18     | 0.310        | 0.05 | 0.047 83 |  | -0.050 48   | 0.150 48 |
| 方差不相等 |                 |       | 1.045       | 16.477 | 0.311        | 0.05 | 0.047 83 |  | -0.051 15   | 0.151 15 |

从表 2 可以看出, 方差方程的 Levene 检验齐性检验结果  $F$  统计量为 0.522, 概率  $P$  为 0.479, 均大于显著性水平 0.05。因此方差具有齐性, 2 组数据无显著性差异。 $T$  检验结果 Sig ( 双侧 ) 的值 0.310 和 0.311 也均大于显著性水平 0.05, 因此也可以判定 2 组数据无显著性差异。综合可以判定 2 组参数无显著性差异, 说明了视觉检测结果的可靠性和使用检测算法的正确性。

4 结语

本文采用机器视觉对某种弹弹体的硬度检测方法进行了研究。通过设计某种弹弹体布氏硬度检测装置和图像处理流程, 并应用 Matlab 图像处理技术实现了对某种弹弹体硬度圆特征的提取和直径的计算, 经过现场实验和统计分析得到以下结论:

- 1) 所采用的检测方法可行且能够提取某种弹弹体的硬度圆特征。
- 2) 通过标准样块的标定能够计算出硬度圆的物理直径。
- 3) 应用统计分析的方法验证了机器视觉检测所测数据的可靠性和正确性。

参考文献:

[1] 董素荣, 陈国光. 弹药制造工艺学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014: 460.  
DONG Su-rong, CHEN Guo-guang. Projectiles and Rockets Producing Technology[M]. Beijing: Beijing Insititute of Technology Press, 2014: 460.

[2] 曹兵, 郭锐, 杜忠华. 弹药设计理论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2016: 95-122.  
CAO Bing, GUO Rui, DU Zhong-hua. Ammunition Design Theory[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2016: 95-122.

[3] 单忠德, 张飞, 任永新, 等. 基于机器视觉铸件布氏硬度在线检测技术研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(1): 157-164.  
SHAN Zhong-de, ZHANG Fei, REN Yong-xin, et al. On Line Detection Technology of the Hardness of Cast Iron

Parts Based on Machine Vision[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(1): 157-164.

[4] 莫玲, 麦康机. 基于机器视觉的车牌识别系统设计[J]. 机电工程技术, 2018, 47(11): 112-116.  
MO Ling, MAI Kang-ji. Design of License Plate Recognition System Based on Machine Vision[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2018, 47(11): 112-116.

[5] 侯幸林, 周培培, 赵景波, 等. 面向机器视觉的不锈钢棒材表面螺纹缺陷检测[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022(5): 109-114.  
HOU Xing-lin, ZHOU Pei-pei, ZHAO Jing-bo, et al. Detection of Thread Defects on Stainless Steel Bar Surface Based on Machine Vision[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Social Science), 2022(5): 109-114.

[6] 张娟飞. 基于机器视觉的大尺寸薄壁机械零件微裂纹检测研究[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(3): 225-228.  
ZHANG Juan-fei. Research on Micro-Crack Detection of Large-Size and Thin-Walled Mechanical Parts Based on Machine Vision[J]. Machine Building & Automation, 2022, 51(3): 225-228.

[7] 魏鸿磊, 蒋志留, 徐家恒, 等. 芯片载带缺陷的机器视觉检测方法[J]. 包装工程, 2022, 43(11): 183-188.  
WEI Hong-lei, JIANG Zhi-liu, XU Jia-heng, et al. Machine Vision Detection Method for Chip Carrier Defects[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(11): 183-188.

[8] 焦博, 刘国宁, 赵孟轩, 等. 基于机器视觉的亚像素精度法兰盘尺寸测量方法 \* [J]. 现代制造工程, 2022(7): 121-126.  
JIAO Bo, LIU Guo-ning, ZHAO Meng-xuan, et al. Flange Size Measurement Method Based on Machine Vision with Sub-Pixel Precision[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2022(7): 121-126.

[9] 薛亮. 基于机器视觉的布氏硬度压痕测量技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2020: 3-9.  
XUE Liang. Research on Indentation Measurement Technology of Brinell Hardness Based on Machine Vi-

- sion[D].Taiyuan: North University of China, 2020: 3-9.
- [10] 钟飞, 赵子丹, 夏军勇, 等. 基于机器视觉的编织袋表面缺陷检测系统设计与实现[J]. 包装工程, 2022, 43(13): 247-256.
- ZHONG Fei, ZHAO Zi-dan, XIA Jun-yong, et al. Design and Implementation of Woven Bag Surface Defect Detection System Based on Machine Vision[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(13): 247-256.
- [11] 王宇杰. 基于机器视觉的水果分级系统设计[J]. 包装工程, 2021, 42(3): 235-239.
- WANG Yu-jie. Design of Fruit Grading Packaging System Based on Machine Vision[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(3): 235-239.
- [12] 常城, 李天剑, 敖勤. 基于图像处理的布氏硬度测试系统设计[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(6): 61-63.
- CHANG Cheng, LI Tian-jian, AO Qin. A Design of the Brinell Hardness Measurement System Based on Image Processing[J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(6): 61-63.
- [13] 敖勤, 许宝杰, 李天剑, 等. 布氏硬度图像自动测量及其 Matlab 实现[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2009, 24(4): 57-61.
- AO Qin, XU Bao-jie, LI Tian-jian, et al. Automatic Measuring of Brinell Hardness Based on Image Processing Using Matlab[J]. Journal of Beijing Institute of Machinery, 2009, 24(4): 57-61.
- [14] 张德丰. 数字图像处理: MATLAB 版[M]. 2 版. 北京: 人民邮电出版社, 2015: 249-251.
- ZHANG De-feng. Digital Image Processing[M]. 2nd ed. Beijing: Posts & Telecom Press, 2015: 249-251.
- [15] GONZALEZ R C, WOODS R E, EDDINS S L. 数字图像处理的 MATLAB 实现[M]. 阮秋琦译. 北京: 清华大学出版社, 2013: 345-347.
- GONZALEZ R C, WOODS R E, EDDINS S L. MATLAB Implementation of Digital Image Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 345-347.

责任编辑: 曾钰婵