

球压试验压痕直径的视觉测量方法

孙江¹, 曾亮², 焦少妮³, 张陈涛², 毛清华⁴

(1. 山西能源学院, 山西 晋中 030006; 2. 厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361102;
3. 太原理工大学 机械运载与工程学院, 太原 030000; 4. 西安科技大学 机械工程学院, 西安 710054)

摘要: 球压试验是测试电工、电子产品中非金属材料及固体绝缘材料耐热性能的重要方法; 由于压球与压痕相接触区域不易准确识别, 如何客观、准确、快速地测量压痕尺寸成为困扰质检人员已久的一大问题; 根据压球与压痕相接触区域与非接触区域对垂直光照反射特性的不同, 通过垂直光照下采集压痕图像可以准确地分割出接触区和非接触区; 图像经过预处理后采用灰度重心法确定压痕的灰度中心位置, 识别压球与压痕接触区域的分界点, 采用 Hough 圆变换计算压痕直径的像素距离, 最后根据标定实验得到直径的实际尺寸; 实验结果表明, 测量结果的重复性标准差 < 0.0016 mm, 重复性限 < 0.003 mm, 测量值与标定结果的偏差的绝对值 < 0.01 mm, 满足压痕测量的精度要求。

关键词: 机器视觉; 球压试验; 压痕直径; 精密测量; 图像处理

Measurement of Indentation Diameter in Ball-pressure Test Based on Computer Vision Method

SUN Jiang¹, ZENG Liang², JIAO Shaoni³, ZHANG Chentao², MAO Qinghua⁴

(1. Shanxi Institute of Energy, Jinzhong 030006, China;

2. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361102, China;

3. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030000, China;

4. Mechanical Engineering School, Xian University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Ball-pressure test is a primary approach to test the thermotolerance of non-metallic materials and solid insulating materials in electrical and electronic products. Accurate measurement of the diameter of the indentation is a key step in the ball indentation test, especially for the critical size of the indentation. The accuracy of the measurement directly determines the correctness of the test results. It is difficult to accurately identify the contact zone between the pressure ball and the indentation. Consequently, how to measure the size of indentation objectively, accurately, and quickly has become a major issue that has plagued quality personnel for a long time. The indentation image was captured under the perpendicular incident light. Since the contact zone and non-contact zone between the pressure ball and the indentation have different reflection characteristics to the perpendicular incident light, the contact zone can be accurately segmented from the non-contact zone by image processing algorithm. After the image is pre-processed, the grayscale center of gravity method is utilized to determine the gray center position of the indentation. The demarcation point of the contact area between the ball and the indentation is identified. Then, the pixel distance of the indentation is calculated through the Hough transformation. Finally, the actual size of the diameter is obtained via the calibration method. Repeatability test and accuracy comparison test results show that the repeatability standard deviation < 0.0016 mm, repeatability limit < 0.003 mm, absolute deviation of the measurements and the calibration results < 0.01 mm, which meets the required precision of indentation measurement.

Keywords: machine vision; ball-pressure test; indentation diameter; precision measurement; image processing

0 引言

球压试验是测试电工、电子产品中非金属材料及固体绝缘材料(除陶瓷外)耐热性能的重要方法^[1-2]。高温条件容易导致非金属材料、绝缘材料特性的变化,如熔融或变软、机械强度下降、绝缘电阻降低,直接影响产品质量和使用安全^[3]。在电工、电子设备中,对于受热损伤后可能

影响设备安全性能的非金属材料外部部件、支撑带电部件的绝缘材料零件、提供附加绝缘或加强绝缘的热塑材料零件应充分耐热,否则高温容易导致设备的失效,严重时可能造成短路、引起火灾、触电等事故^[4]。相关 IEC 标准及国家标准明确规定^[4-5]:应对电工、电子产品的上述相关部件进行球压试验,以保证高温工作条件下产品的相关部件有足够的支撑强度,避免造成电气安全隐患。

收稿日期:2022-01-26; 修回日期:2022-03-24。

基金项目:山西省青年基金(20210302124354)。

作者简介:孙江(1978-),男,山西晋中人,硕士,讲师,主要从事电气智能控制方向的研究。

通讯作者:张陈涛(1986-),男,福建漳平人,博士,助理教授,主要从事光电检测与智能机器人方向的研究。

引用格式:孙江,曾亮,焦少妮,等.球压试验压痕直径的视觉测量方法[J].计算机测量与控制,2022,30(5):69-74,86.

球压试验通过测量所得压痕的直径判断样品的耐热性, 相关国家标准, 如 GB 4706.1-2014《家用和类似用途电器的安全 第一部分: 通用要求》、GB 3883.1-2012《手持式电动工具的安全 第 1 部分: 通用要求》等规定: 若压痕直径 d 不超过 2.0 mm, 则耐热性符合国家标准。标准中定义的压痕直径 d 是指压球与样品相接触区域的最大直径^[4-6]。

国标中明确规定了获取压痕的方法和步骤, 但并未给出压痕直径测量的具体方法。目前压痕直径的测量方法主要有显微镜测量法^[7]、蒙描法^[8-9]、最大值法^[10]、压痕深度测量法^[10]、反射法^[11]及切割法^[11-14]。显微镜法利用显微镜的放大功能, 将压痕置于显微镜下测量。但真实压痕区域与过渡压痕区之间的过渡较平滑, 质检人员在显微镜下须仔细分辨, 故此方法具有一定的难度^[7]。蒙描法是将有色油印均匀地涂在待测压痕样品表面, 接着在压痕样品表面蒙上一层薄的白纸, 用铅笔或带尖的硬物轻轻地描出边缘痕迹, 最后用显微镜测量最大值和最小值, 取中间值作为测量结果。此种方法虽然操作简单, 但是不易准确地分出压痕相接触区域与非接触区域, 需要质检人员根据经验对测量结果进行补偿^[8-9]。最大值法即取测量结果的最大值作为测量结果。从产品认证角度出发, 取最大压痕作为测量值作为测量结果时若满足国家标准的要求, 则压痕样品必定满足国家标准的要求。然而这在一定程度上提升了对材料耐热性的标准, 容易造成原本合格的产品被认定为不达标, 从而造成产品成本提高、资源浪费的风险^[10]。压痕深度测量法则根据压痕深度与直径的关系, 来计算压痕直径。采用特定的工具测量出压球压入样品的深度 h 后, 根据 $d = 2\sqrt{5h - h^2}$ 计算出压痕直径 d 。然而使用该方法计算得到的压痕直径为压痕最大形变处的直径, 并不是真实压痕区的直径^[10]。反射法借助光学反射原理, 能够较准确地找到压痕的边界。球压实验中的钢球近似于一个标准球体, 因此球压压痕和钢球接触的区域也是一个球面, 将其当成一个理想的凹镜, 根据凹镜的聚光效应, 它会将照射到其表面的平行光汇聚到焦点。在强光的照射下, 材料上的真实压痕与周围环境比亮度更高, 根据此特性可以将真正的边界区分开来。然而, 在实际操作过程中, 质检人员观察到的边界通常比较模糊, 不能快速准确地判断压痕的分界点^[11]。切割法是对样品压痕进行横向切割后通过测量压痕切面来计算压痕直径。由于相关安全标准中要求压痕直径小于 2.0 mm, 因此对质检人员的切割手法要求较高, 切割不当容易造成压痕形状破坏, 从而影响试验结果。切割法操作难度大、时间耗费多, 不适用于对效率要求较高的生产检测中^[11-14]。

压痕直径的准确测量是球压试验的关键步骤, 尤其是对于临界尺寸的压痕, 测量的准确性直接决定试验结果的正确与否。如何客观、准确、便捷、快速地测量压痕尺寸已是困扰质检人员已久的一大问题^[15-18]。本文根据压球与压痕相接触区域与非接触区域对垂直光照反射特性的不同, 采集垂直光照下的压痕图像, 图像预处理后通过灰度重心

法得到真实压痕区与过渡压痕区的分界点, 通过 Hough 圆变换得到真实压痕区与过渡压痕区的有效边界, 从而准确地将压球与压痕相接触区域与非接触区域分割开, 计算出压痕直径。

1 球压试验与压痕模型分析

球压试验装置如图 1 所示^[4-6], 国标对球压试验的要求如下: 将球压试验装置和样品支架一并放入加热箱, 加热到标准规定的温度后将试验样品放置在样品支架上大约中心位置处, 再将压力球放置在样品中心位置处并在规定时间内施加一个 $20\text{ N} \pm 0.2\text{ N}$ 的向下作用力, 然后从样品上移去压力球, 在 10 s 内将试验样品浸入温度为 $20\text{ }^\circ\text{C} \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ 水中并保持 $6\text{ min} \pm 2\text{ min}$ 时间后, 从水中取出试验样品, 在之后的 3 min 内去除水分并测量压痕尺寸 d , 如果直径 d 不超过 2.0 mm, 则绝缘材料的耐热性符合国家标准。其中压痕直径 d 指的是压球与样品相接触区域的最大直径。

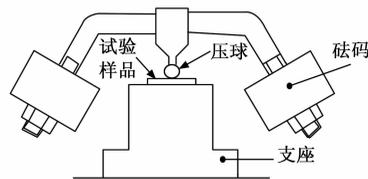


图 1 球压试验装置示意图

图 2 为球压试验所得到的压痕结构示意图。压痕可分为 3 个区域: 未产生形变的区域为非压痕区, 产生形变但与压球未接触的区域为过渡压痕区, 产生形变且与压球相接触的区域为真实压痕区。球压试验所需测量的直径为真实压痕区的直径。

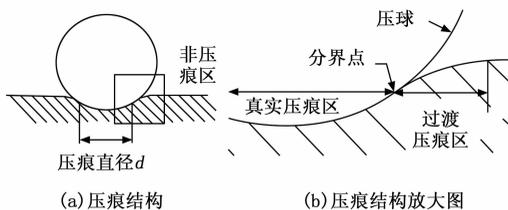


图 2 压痕结构示意图

在垂直光照下, 不同的压痕区域表现出不同的反射特性。如图 3 所示, C 点为压痕中心, B 点为真实压痕区与过渡压痕区的分界点, CB 段为真实压痕区, BA 段为过渡压痕区。相机位于压痕正上方, 垂直光照经 C 点反射后, 大部分可进入镜头参与成像。从 C 点至 B 点, 切线斜率逐渐变大, 反射后进入镜头的光照逐渐减少, 而从 B 点至 A 点, 切线斜率逐渐减小, 反射后进入镜头参与成像的光线逐渐增多。在整个压痕模型中, 分界点 B 的切线斜率最大, 反射后参与成像的光线最少。

2 压痕直径的测量

2.1 测量装置的设计

装置结构如图 4 所示, 蓝光 LED 阵列的出射光经透镜

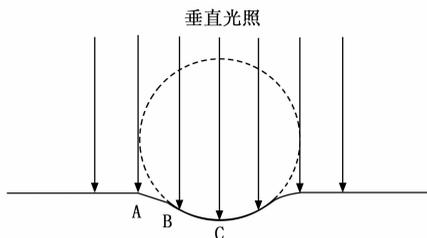


图 3 压痕对垂直入射光的反射模型

聚焦于直径为 20 μm 的小孔光阑上, 再经透镜准直后平行出射, 经分光镜反射后与镜头同轴。镜头为放大倍数 1X 的远心镜头。压痕区域不在一个平面内, 而远心镜头景深大且景深范围内透视误差小, 使用远心镜头可使整个压痕区域内的图像放大倍率保持不变。

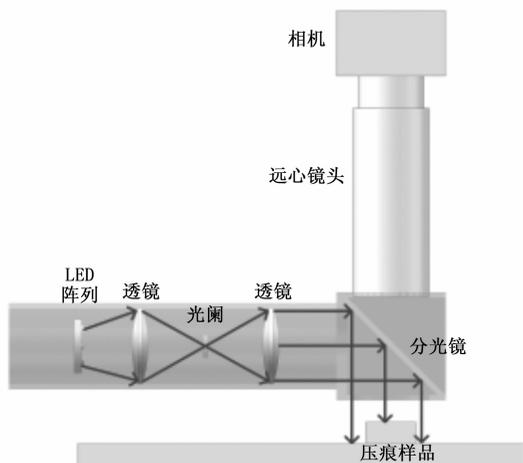


图 4 压痕测量装置

2.2 压痕图像的预处理

压痕测量装置采集的压痕图像如图 5 (a) 所示。图像采集过程容易受噪声污染, 如杂散光、传感器的暗电流噪声、散粒噪声等。滤波处理是去除噪声的有效方法。滤波根据所在的信号域不同, 可以分为空间域滤波和频域滤波。空间域滤波是直接对图像空间中的像素点进行处理, 通常是借助模板进行邻域操作完成。常见的空间域滤波有: 均值滤波、中值滤波、高斯滤波等。频域滤波是指图像经过某种数学变换, 在频域中对图像进行滤波处理, 处理后再经反变换得到空间域图像。常见的频域滤波有高通滤波、低通滤波等。

根据测量装置采集到的图像的噪声特点, 采用 5×5 的高斯模板对压痕图像进行滤波, 减少图像噪声。高斯滤波在降噪的同时容易导致图像边缘、细节模糊, 因此滤波后采用 Wallis 锐化算法对压痕图像进行锐化处理。Wallis 锐化算法是一种局部自适应图像增强算法, 它可以同时对不同亮度区域的对比度进行调整。它的主要原理是通过调节图像邻域的亮度, 从而调整图像不同位置的局部方差和均值。Wallis 锐化算法可对暗区的细节进行较好的锐化, 凸显真实压痕区与过渡压痕区的边界^[19]。滤波、锐化处理后的

的压痕图像如图 5 (b) 所示。



(a) 采集的压痕图像 (b) 图像的滤波与锐化

图 5 图像预处理

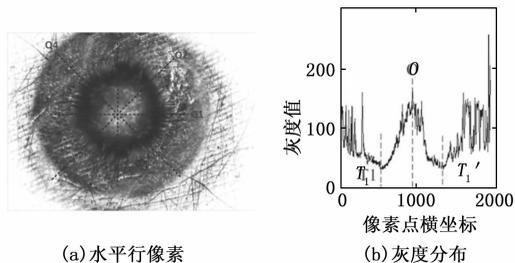
2.3 边界的识别

首先采用灰度重心法确定压痕的灰度中心位置。灰度重心法, 即以灰度为权值的形心法, 它利用像素点的灰度值信息与位置信息确定中心, 灰度重心法的表达式如式 (1) 所示。

$$X_0 = \frac{\iint_{(x,y) \in S} Xf(x,y)dXdY}{\iint_{(x,y) \in S} f(x,y)dXdY} \quad Y_0 = \frac{\iint_{(x,y) \in S} Yf(x,y)dXdY}{\iint_{(x,y) \in S} f(x,y)dXdY} \quad (1)$$

式中, $f(x, y)$ 表示坐标为 (X, Y) 像素点的灰度值, (X_0, Y_0) 为计算得到的压痕图像灰度中心点 O 的坐标值。

如图 6 (a) 所示做过 (X_0, Y_0) 的直线 Q_0 , Q_0 的灰度分布 P_0 如图 6 (b) 所示。由于样品表面存在划痕及其它表面缺陷, P_0 部分区域的灰度分布值变化剧烈。与压痕表面对垂直入射光的反射特性相对应, 从灰度中心点 O 至真实压痕区与过渡压痕区的分界点, 灰度值逐渐减小, 从分界点至过渡压痕区, 灰度值逐渐增大。分界点处于压痕中心点两侧灰度值的斜率发生突变之处。首先通过低通滤波去除 P_0 中的高频噪声, 通过一阶微分算子在中心点 O 的两侧识别斜率发生突变的点 T_1 、 T_1' 。将直线 Q_0 按顺时针方向以 1° 为步长依次旋转至 180° , 从而得到 180 条灰度分布曲线, 图 5 (a) 中 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 分别表示直线 Q_0 分别旋转 45° 、 90° 、 135° 后对应的直线。分别取上述 180 条直线对应的灰度分布曲线中斜率发生突变的点, 得到真实压痕区与过渡压痕区的分界点图, 如图 6 (c) 所示。



(a) 水平行像素

(b) 灰度分布



(c) 压痕分界点

图 6 压痕分界点的确定

2.4 压痕直径的计算

对得到的分界点进行 Hough 圆变换, 得到真实压痕区与过渡压痕区的有效边界, 如图 7 所示。Hough 圆变化算法是一种基于参数空间的投票算法, 它利用了图像的全局特性, 受噪声和边界间断的影响较小, 尤其对噪声图像具有良好的稳定性和鲁棒性, 因此边界点的不连续及边界点局部噪声对真实压痕区与过度压痕区有效边界的影响小。Hough 圆变换是将图像上每一个非零像素点视为一个潜在的圆上的点, 通过投票函数生成累加器, 设置一个累计权重来定位圆。在笛卡尔坐标系中, 圆的方程可以用式 (2) 表示。

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2 \quad (2)$$

其中: (a, b) 是圆心, r 是半径。将其换一种形式表述为:

$$\begin{aligned} x &= a + r\cos\theta \\ y &= b + r\sin\theta \end{aligned} \quad (3)$$

即:

$$\begin{aligned} a &= x - r\cos\theta \\ b &= y - r\sin\theta \end{aligned} \quad (4)$$

所以在 $a-b-r$ 组成的三维坐标系中, 一个点可以唯一确定一个圆。在笛卡尔坐标系中, 过某一点的圆映射到 $a-b-r$ 坐标系中为一条三维曲线。经过笛卡尔坐标系中所有非零像素点的所有圆就构成了 $a-b-r$ 坐标系中多条三维曲线。在笛卡尔坐标系中同一个圆上的点的圆方程相同, 则这些点映射到 $a-b-r$ 坐标系中的曲线相交于同一点, 因此在 $a-b-r$ 坐标系中这个点一共有 N_0 条曲线相交, 其中 N_0 代表圆的总像素。通过判断 $a-b-r$ 坐标系中每一个点的相交数量, 认定大于设定好的阈值的点为圆^[20]。

Hough 圆变换处理后的结果如图 7 所示。通过 Hough 圆变换计算得到压痕边界的圆心坐标为 $(1\ 149.24, 939.76)$, 半径为 $r=274.96$ 像素。

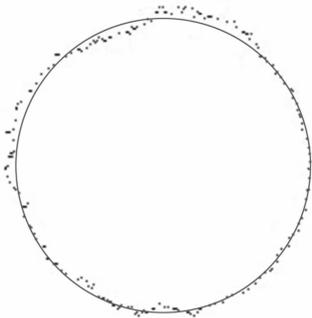


图 7 Hough 变换获取压痕有效边界

2.5 压痕直径测量仪的标定

标定是压痕直径测量过程中的一个重要环节。图像测量的结果为像素值, 若要得到测量结果的实际尺寸, 必须建立起图像像素和实际尺寸之间的关系, 即求得像素当量值的大小。标定便是建立图像像素与实际尺寸关系的过程。常用的标定方法有标准件法^[21]及标准位移法^[22]。其基本思想是把标准件的精确尺寸或标志物的标准位移传递给图像系统, 再测量图像系统中标准件或标准位移相应的像素值,

以此来建立图像像素与实际尺寸的关系。标准件法直接对标准件进行测量。相机捕获标准件的图像后, 通过图像处理可以在图像上得到以像素为单位的标准件尺寸数值。再根据标准件的精确尺寸和像素尺寸计算得到水平像素当量和垂直像素当量。标准件法是二维图像测量系统最为常用的标定方法^[21], 但该方法对标准试件的精度及标定环境的温湿度具有较高的要求。标准位移法则无需使用标准试件, 该方法对标定物品的加工精度要求低, 即使在缺少标准件的情况下也能使用该方法进行标定。标准位移法的主要原理是首先对标定物品进行成像, 随后使标定物品在视场范围内移动一定的距离, 并通过高精度测量设备测得标定物品移动的距离值, 再次对移动后的标定物品进行成像。通过标定物品移动前和移动后的两幅图像, 计算出标定物品移动的像素距离。根据标定物品移动的实际距离和像素距离便可得到像素当量大小^[22]。本文采用标准位移法对压痕测量装置进行标定, 标定装置的设计和图像处理算法是标定实验的重要环节。

2.5.1 标定装置

标定实验装置如图 8 所示, 使用双频激光干涉仪测量标定物品的移动距离。标定装置由 4 个部分组成: 待标定的压痕测量装置、水平导轨、标定物品和双频激光位移测量系统。其中双频激光位移系统主要包括测量反射镜、线性干涉镜、温度传感器、湿度/压强传感器以及激光器, 如图 9 所示。首先调节双频激光干涉仪使得光轴方向和水平导轨平行, 并调节标定物品的位置使标定物品的边缘与水平导轨尽量保持垂直, 并落在压痕测量装置视场内。使用压痕测量装置采集标定物品的边缘图像, 并清零双频激光干涉仪读数。然后将标定物品沿着水平导轨方向移动一定的距离, 标定物品移动过程中应使边缘保持在压痕测量装置视野中, 并通过双频激光干涉仪测量标定物品边缘移动的距离, 记为 D 。同时压痕测量装置采集移动后的标定物品边缘图像。在标定物品移动前后的两张图像中, 通过图像处理求出此时标定物品移动的像素距离 L 。压痕测量装置的像素当量值为双频激光干涉仪测量的空间位移 D 与图像处理测量的像素位移 L 的比值, 即 $a=D/L$ 。由于压痕测量装置使用的工业相机中 CCD 传感器的像素为方形, 并且远镜头放大倍数各向同性, 因此压痕测量装置中 X 轴和 Y 轴的像素当量相等。

2.5.2 位移计算

标定物品边缘移动前后采集的图像如图 10 所示。以标定物品的前边缘作为参考, 计算标定物品在图像中移动的像素距离便可通过计算标定物品前边缘的移动距离得到。为了减少环境噪声等因素对位移计算的影响。以图像水平中线为中心取图像的 $1/4$ 作为特征区域进行后续图像处理。特征区域提取并不会减少标定物品的位置信息, 特征区域图像如图 11 所示。

1) 滤波降噪:

由于环境因素以及图像采集的影响, 采集到的图像中

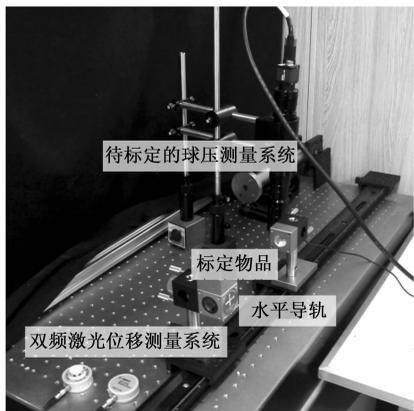


图 8 标定装置

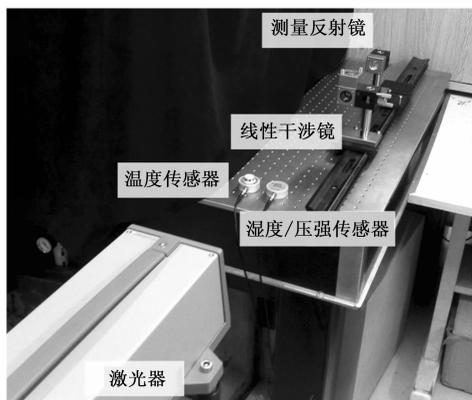


图 9 双频激光直线位移测量装置

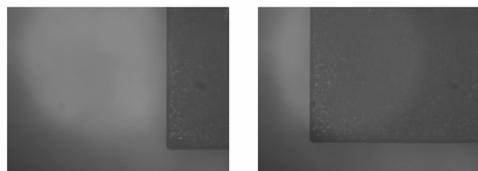


图 10 底板图像



图 11 特征区域的提取

存在椒盐噪声和高斯噪声。采用高斯滤波可以有效减少噪声的影响, 此处采用 5×5 的方形模板对特征区域图像进行高斯滤波处理。

2) 图像分割与填充:

滤波降噪后需要将标定物品与其它区域进行分割。根据标定物品和其它区域灰度值的不同, 采用阈值法将二者进行分割。由于分割后的标定物品区域内存在许多空洞, 采用膨胀-腐蚀算法对分割后的图像进行处理。膨胀-腐蚀算法可有效填充空洞, 且不影响标定物品前边缘的位置。

3) 标定物品前边缘提取:

采用 Susan 算子对分割与填充后的图像进行处理, 检测得到标定物品的前边缘点。为了减少错误边缘点的影响,

使用基于最小二乘法的直线拟合算法对提取到的边缘点进行拟合, 拟合结果如图 12 所示, 图中白色线条为拟合后的标定物品前边缘。



图 12 直线拟合后的结果

4) 计算标定物品前边缘移动的像素距离:

标定物品移动前边缘拟合的直线记为 L_1 , 移动后拟合的直线记为 L_2 , 计算直线 L_1 和 L_2 之间的平均距离, 该平均值便是底板前边缘移动的像素距离。

2.5.3 标定结果

图像处理测量得到标定物品前边缘沿直线导轨移动的像素距离为 $L=1\,247.33\text{ pix}$ 。双频激光干涉仪测量得到的标定物品实际移动的距离为 $4\,300.292\,1\ \mu\text{m}$ 。由于标定环境中的微振动、空气流动及日光灯的频闪, 使得双频激光干涉仪测量读数中的后两位不稳定, 故舍去测量结果的最后 2 位, 即取实际移动距离 $D=4\,300.29\ \mu\text{m}$ 。计算可得像素当量 $a=D/L=3.448\ \mu\text{m}/\text{pix}$ 。从而可计算得压痕直径为 $d=2r \times a=1.896\,1\ \text{mm}$, 小于国标所规定的 $2\ \text{mm}$, 因此可判定材料的耐热性满足国标要求。

3 实验与分析

3.1 实验

为了检验测量方法的有效性, 进行了重复性试验及精度比对试验。10 个压痕样品由厦门出入境检验检疫局技术中心国家电气安全检测重点实验室提供。图 13 所示为样品 1~3, 白色圈内为压痕所在区域。



图 13 压痕样品

1) 重复性实验:

在实验室环境 (温度 $25\ ^\circ\text{C}$ 、相对湿度 45%) 使用本文所研制的基于图像测量的压痕直径测量仪重复测量样品 1, 每次测量都移动样品或旋转样品, 使得样品在仪器视场中的位置不同或角度不同。20 次独立测量的结果如图 14 所示, 平均值为 $1.896\,8\ \text{mm}$, 由贝塞尔公式计算得到的实验标准差为 $0.001\,1\ \text{mm}$, 重复性限 $<0.025\ \text{mm}$ 。

同样, 对样品 2~10 分别进行重复性试验, 各个样品 20 次重复测量的标准差均小于 $0.001\,6\ \text{mm}$, 重复性限均小于 $0.003\ \text{mm}$ 。

2) 精度比对实验:

为了检验测量精度, 将样品 1~10 送交厦门市计量检定测试院进行检定, 并将标定结果与本文方法的测量结果进行比对, 结果如表 1 所示。检定所使用的的仪器为万能

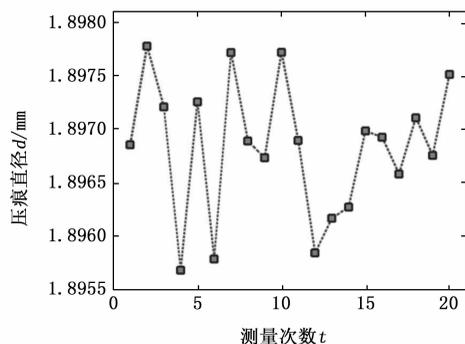


图 14 重复性试验测量结果

工具显微镜 19JC, 是上海光学仪器一厂所生产的, 其仪器分度值为 0.0005 mm , 不确定度 $(1+L/100)\text{ }\mu\text{m}$, L 代表测量长度, 单位为 mm 。过渡压痕区与真实压痕区之间为连续变化, 因此在工具显微镜下不易精确定位二者的分界点, 工具显微镜下的测量值与真实值之间可能存在一定的偏差, 偏差的大小与工具显微镜的精度及质检人员的经验有关。为了减小工具显微镜下的测量值与真实值之间的偏差, 提高测量的准确性, 表 1 中每个样品的测量值都由 3 名经验丰富的质检人员使用万能工具显微镜 19JC 分别独立测量 5 次取均值而得。表 1 中本文方法的测量值为样品重复测量 5 次取得的平均值。

表 1 精度比对试验结果

样品编号	本文方法测量值/mm	标定值/mm	偏差/mm
样品 1	1.896 4	1.902 0	-0.005 6
样品 2	1.945 5	1.943 5	0.002 0
样品 3	2.147 6	2.139 5	0.008 1
样品 4	1.523 8	1.530 5	-0.006 7
样品 5	1.598 4	1.605 0	-0.006 6
样品 6	1.733 1	1.741 0	-0.007 9
样品 7	1.802 5	1.808 0	-0.005 5
样品 8	1.360 2	1.356 5	0.003 7
样品 9	2.377 6	2.385 5	-0.007 9
样品 10	2.313 3	2.312 0	0.001 3

由表 1 可知, 10 个压痕样品的测量精度比对结果中, 最大偏差为 0.0081 mm , 偏差绝对值的平均值为 0.0055 mm 。由此可知本文方法的测量值与标定结果的偏差的绝对值 $<0.01\text{ mm}$, 满足球压测量的精度要求。

3.2 压痕测量精度影响因素分析

通过上述实验可知, 本文提出的压痕测量方法与研制的压痕测量装置具有较高的精度, 但仍存在一定误差, 影响压痕测量精度的因素主要包括以下 4 个方面。

1) 光源平行性:

本文根据压球与压痕相接触区域与非接触区域对垂直光照反射特性的不同来测量压痕大小, 光源的平行性将直接影响测量精度。在本测量装置中, 光阑大小直接影响出射光的平行度和光照度。光阑过大导致出射光平行度差, 光阑过小则光照度小。本文选择直径为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 的小孔光阑,

出射光的平行度和光照度可同时得到较好的保证。

2) 环境杂散光:

图像采集过程中容易受到周围环境中杂散光的影响。本文采用高斯模板对压痕图像进行滤波, 减少图像噪声, 但滤波的引入会引起边界像素点的漂移, 影响测量精度。本文选择 5×5 的高斯模板进行滤波, 既能较好的去除杂散光的影响, 也能尽量减小边界像素的漂移。

3) 镜头成像:

图像采集系统中使用镜头进行成像, 由此产生的畸变和透视误差始终无法避免。本文采用远心镜头进行成像, 远心镜头畸变小、景深大, 且景深范围内透视误差小, 可有效减小成像引入的误差。

4) 图像处理算法的准确性:

图像处理算法尤其是边界识别算法的准确性直接影响压痕测量的精确度。本文通灰度重心法识别真实压痕区与过渡压痕区的分界点, 具有较好的准确性。

4 结束语

本文提出了一种快捷、准确的球压试验压痕直径测量方法, 解决了现有压痕测量方法无法精确区分真实压痕区与过渡压痕区的问题, 提高了测量结果的客观性。根据压球与压痕相接触区域与非接触区域对垂直光照反射特性的不同, 在垂直光照下采集压痕图像, 识别压球与压痕的接触区域的分界点, 进而计算压痕直径。实验结果表明, 使用本方法测量压痕直径, 测量结果的重复性标准差 $<0.0016\text{ mm}$, 重复性限 $<0.003\text{ mm}$, 测量值与标定结果的偏差的绝对值 $<0.01\text{ mm}$, 满足压痕测量的精度要求。然而本文仅通过实验的方法检测了该测量方法的有效性, 虽初步分析了测量误差的来源, 但并未对测量误差的传递过程进行深入分析, 该部分内容将在后续工作中完成, 后续工作还将根据误差分析的结果对测量装置与算法进行优化, 进一步提高测量结果的准确性。

参考文献:

- [1] 邹声文, 郭少华, 付锦锋, 等. 球压试验压痕尺寸准确快速测量方法探究 [J]. 广东化工, 2019, 46 (3): 53-54.
- [2] 苏君平, 张建寰. 球压试验压痕尺寸的测量技术现状及发展趋势 [J]. 机电技术, 2009, 32 (S1): 49-53.
- [3] 谢云涛, 陈敏, 夏正阳. 球压试验的测试技术分析 [J]. 低压电器, 2013 (15): 55-58.
- [4] GB 4706. 1-2014, 家用和类似用途电器的安全 第 1 部分: 通用要求 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [5] GB/T 5169. 21-2017, 电工电子产品着火危险试验第 21 部分: 非正常热球压试验 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [6] GB 3883. 1-2012, 持式电动工具的安全 第 1 部分: 通用要求 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [7] 刘溪, 陈凌峰, 周敏, 等. 基于数字图像处理技术的球压测试压痕自动测量 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (6): 1262-1265.

(下转第 86 页)

- [2] 孙文, 林平, 卢冶, 等. 用于电动汽车的双向 DC/DC 变换器控制设计 [J]. 电力电子技术, 2012, 46 (7): 40-42.
- [3] 杨惠, 骆姍, 孙向东, 等. 光伏储能双向 DC-DC 变换器的自抗扰控制方法研究 [J]. 太阳能学报, 2018, 39 (5): 1342-1350.
- [4] 王朝明, 王华广, 王晴. 基于双 PI 控制器的模块化多电平变换器环流抑制策略 [J]. 电网技术, 2014, 38 (10): 2905-2912.
- [5] KATSUHIKO O. 现代控制工程 [M]. 电子工业出版社, 2003.
- [6] 冯全源, 严宏举. 一种变参数比例积分控制 BUCK 变换器设计 [J]. 电机与控制学报, 2016, 20 (5): 68-76.
- [7] 陶永华, 尹怡欣. 新型 PID 控制及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [8] 高朝晖, 林辉. 状态空间设计在 DC/DC 变换器反馈控制中的应用 [J]. 电机与控制学报, 2007 (4): 403-407.
- [9] 黄卫平, 谢运祥. 基于 Lyapunov 直接法控制的新型 Boost 功率因数校正开关变流器 [J]. 低压电器, 2010 (4): 57-60.
- [10] 谢世杰, 曹玉华, 戴国平. 基于状态观测器的 DC-DC 升压变换器反演控制 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (5): 98-102.
- [11] 陆益民, 张波, 尹丽云. DC/DC 变换器的切换仿射线性系统模型及控制 [J]. 中国电机工程学报, 2008 (15): 16-22.
- [12] BHAT S, BERNSTEIN D. Finite-time Stability of Continuous Autonomous Systems [J]. SIAM Journal on Control and Optimization, 2000, 38 (3): 751-766.
- [13] 杨晨, 程盈盈, 都海波, 等. Buck 型变换器自适应有限时间降压控制算法研究 [J]. 自动化学报, 2016, 42 (2): 315-320.
- [14] 冯昱澍, 刘昆, 冯健. 航天器姿态跟踪有限时间自适应积分滑模控制 [J]. 电子科技大学学报, 2021, 50 (4): 527-534.
- [15] 赵辉, 袁大壮, 王红君, 等. 电力系统有限时间稳定控制策略 [J]. 控制与决策, 2018, 33 (12): 2283-2288.
- [16] CHENG Y, DU H, YANG C, et al. Fast adaptive finite-time voltage regulation control algorithm for buck converter system [J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems II Express Briefs, 2016, 64 (9): 1082-1086.
- [17] ZHANG L, WANG Z, LI S, et al. Universal finite-time observer based second-order sliding mode control for DC-DC buck converters with only output voltage measurement [J]. Journal of the Franklin Institute, 2020, 357 (16): 11863-11879.
- [18] 谭嘉林. 切换连续系统的有限时间稳定、有界及应用含有限时间不稳定子系统情形 [D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- [19] 高永峰. 非线性控制系统的事件触发机制设计 [D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [20] XING L, WENG C, SU H, et al. Event-triggered adaptive control for a class of uncertain nonlinear systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2016, 62 (4): 2071-2076.
- [21] LIU C, LIU X, WANG H, et al. Event-triggered adaptive finite-time prescribed performance tracking control for uncertain nonlinear systems [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2020, 30 (18): 8449-8468.
- [22] 南余荣, 陈姝瑾, 王满意. 基于 GPI 观测器的 Buck 型变换器趋近律控制 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (8): 89-94.
- [23] 丁世宏. 非线性系统的有限时间控制若干问题研究 [D]. 南京: 东南大学, 2010.
- [24] LI M, GUO J, XIANG Z. Global adaptive finite-time stabilization for a class of p-normal nonlinear systems via an event-triggered strategy [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2020, 30 (10): 4059-4074.
- [25] QIAN C, LIN W. Non-Lipschitz continuous stabilizers for nonlinear systems with uncontrollable unstable linearization [J]. Systems & Control Letters, 2001, 42 (3): 185-200.
- [26] QIAN C, JI L. Global output feedback stabilization of upper-triangular nonlinear systems using a homogeneous domination approach [J]. International Journal of Robust & Nonlinear Control, 2010, 16 (9): 441-463.
- [15] 陈凌峰, 刘群兴, 罗宗敏. 球压试验压痕判定方法 [J]. 安全与电磁兼容, 2006, 18 (6): 62.
- [16] 王忠义. 球压试验 [J]. 安全与电磁兼容, 2005, 17 (1): 75-76, 81
- [17] 柯远辉. 谈 GB4706. 1 的球压试验 [J]. 家用电器科技, 2000 (7): 62-63.
- [18] 朱俊杰, 周培贤. 球压痕硬度试验原理及正确使用 [J]. 计量技术, 1987, 31 (2): 17-19.
- [19] 张力, 张祖勋, 张剑清. Wallis 滤波在影像匹配中的应用 [J]. 武汉测绘科技大学学报, 1999, 43 (1): 24-27, 35.
- [20] 朱桂英, 张瑞林. 基于 Hough 变换的圆检测方法 [J]. 计算机工程与设计, 2008, 29 (6): 1462-1464.
- [21] 王建民, 浦昭邦, 赵辉, 等. 一种新的二维图像测量系统标定方法 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2000, 47 (3): 37-41.
- [22] 王建民, 浦昭邦, 晏磊, 等. 二维图像测量机系统的研究 [J]. 仪器仪表学报, 2001, 22 (4): 349-353.

(上接第 74 页)

- [8] 何东升. 基于球压比对试验探讨压痕测量技术的改进 [J]. 计量与测试技术, 2014, 41 (2): 3-4, 6.
- [9] 田鹏, 周洪, 倪榴铭, 等. 电工电子产品球压试验研究 [J]. 环境技术, 2013, 05 (19): 20-39.
- [10] 杨杰, 赵延轲. 球压试验压痕尺寸测量新方法探究 [J]. 电子测试, 7 (19): 45-46.
- [11] 刘思哲. 电气电子产品用非金属材料性能分析 [J]. 电子测试, 2015, 9 (2): 126-128.
- [12] 于静. 热塑性塑胶材料球压试验及测量不确定度评定 [J]. 现代测量与实验室管理, 2014, 22 (5): 13-14.
- [13] 万程. 球压试验及非金属材料耐热性分析 [J]. 家电科技, 2014, 34 (2): 48-50.
- [14] 杜锡勇, 冯荣彪, 王国良. 灯具绝缘材料在耐热试验中压痕直径的不确定度评定 [J]. 中国照明电器, 2009, 39 (10): 34-37.