

双断点电器触头三维运动轨迹测量方法与可视化分析

邓传传, 刘向军

(福州大学电气工程与自动化学院 福州 350108)

摘要:双断点电器广泛应用于电力、工业控制与新能源等领域,其触头运动过程及同步性是影响电气寿命、分断能力及运行可靠性的关键。针对这类电器触头在运动过程中易发生偏移导致运动轨迹难以准确检测的问题,提出了一种基于虚拟双目视觉的双断点电器触头运动检测方法,并实现其运动过程的可视化分析。利用单台高速摄像机及双平面镜构建三维测试系统,在两触头上分别布置标记点,采集闭合和分断过程中的运动图像。并设计了一种图像处理算法,实现标记点的自动识别和提取,通过三维重建技术还原其空间运动轨迹,形成表征双触头运动的特性曲线。实验验证结果表明,该测试系统最大误差不超过4.28%,平均误差为1.26%。针对某型号双断点高压直流继电器闭合和分断过程的测试分析显示,闭合过程两触头沿主运动方向产生一定的位移差和时间差;分断后两触头未完全返回闭合状态的初始位置。此外,两个触头在其他方向上也存在位移偏差,表明双触头在动作过程中存在动态差异性和明显的不同步现象。通过可视化分析,可清晰呈现双断点电器触头内部运动偏移状态,验证了基于虚拟双目视觉的双断点检测方法能够在非接触条件下,实现双触头的三维运动轨迹的精确测量与可视化。

关键词:双断点电器触头;运动轨迹;虚拟双目视觉;图像处理;可视化

中图分类号: TM506 TH89 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.40

3D motion trajectory measurement method and visualization analysis for double-break contacts of electrical apparatus

Deng Chuanchuan, Liu Xiangjun

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Double-break electrical apparatuses are widely used in the fields such as power system, industrial control, and new energy, etc. The motion process and the synchronization of contacts are key factors that affect the electrical life, breaking capability, and operational reliability. Such electrical contacts are prone to positional deviation during motion, making their motion trajectories difficult to measure accurately. To address those issues, A virtual binocular-vision - based approach is proposed to detect the motion of double-break electrical contacts and to enable visual analysis of their motion process. A three-dimensional testing system was developed using a single high-speed camera and two plane mirrors. Markers were placed on each contact to capture motion images during the closing and opening processes. An image processing algorithm was designed to automatically identify and extract the markers. Three-dimensional reconstruction was then used to reconstruct the spatial motion trajectories, generating characteristic curves representing the motion of the dual-contact apparatus. Experimental validation of the test system revealed that the proposed method can achieve a maximum error of 4.28%, with an average error of 1.26%. Testing of the closing and opening processes of a dual-breakpoint high-voltage DC relay revealed that during the closing process, the two contacts experience a certain displacement and time difference along the main motion direction; after opening, the two contacts do not return to their closed positions. Furthermore, displacement deviations between the two contacts are also observed in other directions, indicating dynamic differences and significant asynchrony during the dual-contact motion. Through visual analysis, the internal motion offset state of the double-breakpoint electrical contacts can be clearly presented. This shows that the double-breakpoint detection method based on virtual binocular vision can achieve accurate measurement and visual analysis of the three-dimensional motion trajectory of the two contacts under non-contact conditions.

Keywords: double-break electrical apparatus contact; movement trajectory; virtual binocular vision; image processing; visualization

0 引言

双断点电器是重要的机电元件, 在电力系统、航空航天、新能源和电动汽车等领域有着广泛的应用, 起着重要控制与保护的作用^[1-2]。双断点电器通过触桥在电流路径上设置两对触头, 断开时形成两个串联的断口, 降低了单个断口的电压, 加速电弧的熄灭。由于两个断口分担电弧能量, 冷却更快, 尤其适合高电压或大电流场合。但双断点电器触头必须同步动作, 闭合时若一对触头后接触, 将承受全部合闸涌流和预击穿电弧, 加速磨损甚至熔焊; 分断时若一对触头先分离, 将承受全部恢复电压和分断电弧, 导致该触头严重烧蚀甚至失效。在理想情况下, 双断点电器触头在空间中以一维的运动状态呈现。然而受设计、装配、机械加工及模具精度等因素的制约, 触桥无法均匀受力, 导致触桥可能发生横向偏移、纵向倾斜或者触头不同步动作^[3-6]。三维测试能够同时、独立、高精度地测量两个触头在 3 个空间维度上的位移、速度、加速度随时间的变化, 可量化两个触头的动作时间差(同步性)以及各自的运动轨迹是否稳定等问题。因此对双断点电器的触头运动过程进行三维测试具有重要意义。

与位移传感器相比, 高速摄像机在测量物体运动时不仅能实现非接触测量, 还能进行二维或三维测试, 通过图像处理获取触头运动过程的信息。如文献[7]在断路器触头上粘贴标记点, 利用高速摄像机捕捉触头分断和闭合过程, 将标记点的像素尺寸换算为实际物理尺寸, 据此将断路器分合闸过程标记点的像素位移转化为实际二维位移。袁永明等^[8]提出一种基于图像处理技术的罗非鱼运动监测方法, 利用高清摄像机获取鱼群运动的视频, 再对图像进行去噪、灰度和阈值分割等处理实现对鱼群运动的二维空间运动状态监测。而基于双目视觉原理, 结合三维重建技术, 能够更全面地感知目标物体的三维空间信息, 实现三维测量^[9-12]。如文献[13]将基于线激光投影与双目视觉相结合, 再利用图像处理获取电缆激光位置的三维点云坐标。文献[14]搭建了基于双目视觉原理的测量平台, 在弹体和弹拖表面设置特殊标记点, 利用两台高速摄像机对标记点进行跟踪拍摄, 再对标记点进行图像处理, 实现对弹托分离角的测量。近年来, 随着检测技术的发展, 将双目视觉技术应用于微小位移动态测量(如电器的三维运动检测)已日渐成熟。王紫正等^[15]采用两台高速工业相机采集断路器连杆合、分闸过程的运动图像, 利用归一化互相关算法提取关键区域并匹配, 生成视差图, 进而重建连杆的三维运动轨迹, 得到断路器的运动特性曲线和参数。然而传统的双目视觉三维测试方法需使用两台摄像机, 不仅设备成本高, 而且为确保左右图像在完全相同的时刻捕获, 需要严格的硬件

同步触发。针对这一问题, 本研究提出采用单摄像机结合平面镜构建虚拟双目视觉系统, 实现了电磁电器触头三维运动的测量^[16]。

为测试双断点电器工作过程中触头三维运动轨迹, 本研究提出一种基于虚拟双目视觉的双断点电器触头运动的检测方法。与单断点电器仅需跟踪单触头运动不同, 双断点电器包含两对触头, 其分断与闭合过程可能存在不同步和空间偏移。采用基于 OpenCV 图像处理技术, 实现对每帧图像中双触头标记点质心坐标的自动提取, 显著减少了人为干预, 提高了处理效率, 且显著提升了提取结果的稳定性和一致性。在此基础上, 利用三维重建原理, 将其运动过程中的像素坐标转换为三维运动曲线, 从而获取双断点触头运动的深度信息。为更直观呈现电器结构及运动特性, 还提出了电器三维运动可视化方法, 用于深入分析双断点电器在闭合和分断过程中的偏移行为, 为双断点电器的结构优化提供与性能提升提供理论指导和技术支持。

1 双断点电器工作原理及结构特点

双断点电器是一类在同一极上设置两个断口的电磁开关装置, 应用于对分断能力和电气寿命要求较高的场合, 常见的有断路器、接触器、高压直流继电器等。其中高压直流继电器应用于新能源汽车及充电桩、储能、光伏发电等多个领域, 具备普通电磁继电器无法替代的优势, 本研究以高压直流继电器为例说明双断点电器的工作原理和结构特点。高压直流继电器由电磁系统、触头系统和灭弧系统构成, 其总体结构如图 1 所示。电磁系统包括线圈、动铁心、静铁心、磁轭和反力弹簧。触头系统包含动触桥、动触头、静触头和触头弹簧。其中动触桥通过连动杆与动铁心相连, 其两端安装两个动触头。灭弧系统由安装在触头两侧的永磁体构成, 大容量电器还充入氢气等灭弧介质。当线圈通电后产生磁场使铁心磁化, 产生电磁吸力使动铁心克服反力弹簧的作用向静铁心运动, 并通过连动杆带动动触桥向静触头运动, 使两对动、静触头闭合。线圈断电时, 磁场消失, 电磁吸力不复存在, 在反力弹簧的作用下实现动、静触头分离, 在永磁体和灭弧介质的作用下熄灭电弧。

在继电器通断过程中, 双触头往往会表现出三维空间上的不平衡运动。这些不平衡通常源于触桥结构制造不对称、装配偏心、连动杆与磁轭之间的间隙过大等因素。长期运行下, 这些结构性偏差进一步放大, 将会加速继电器的机械结构磨损、松动或疲劳, 显著降低其使用寿命。为了揭示这些内部结构性偏差对触头动态行为的影响, 引入三维测试系统对触头运动过程进行测试。通过对触头关键标记点进行三维重建, 可获得触头在通断全

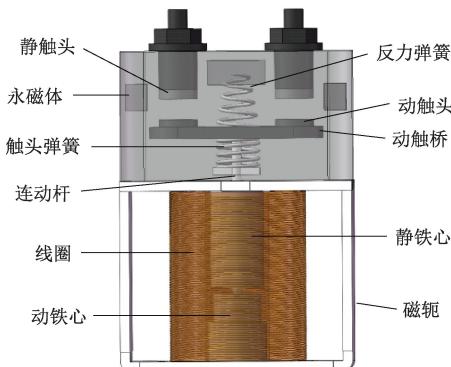


图 1 双断点电器结构

Fig. 1 The illustration of double-break electrical apparatus

过程空间三维运动轨迹,实现对双触头位移量、偏移趋势及运动一致性分析,不仅能够直观展示触头运动路径的变化,还能将微小的偏移以可视化方式呈现出来,从而更清晰地反映双断点电器结构偏差对电器动态过程的影响。

2 虚拟双目视觉三维测试系统和重建原理

2.1 三维测试系统

为了对双断点电器触头运动轨迹进行测量,构建了一套虚拟双目视觉三维测试系统,由一台高速摄像机、两面平面镜、卤素灯、固定台、被测电器及控制回路组成。通过在摄像机前方以特定角度布置平面镜,使摄像机能够同时呈现来自左右两个镜面的反射图像,从而实现双目立体视觉的功能。三维测试系统示意图如图 2 所示。

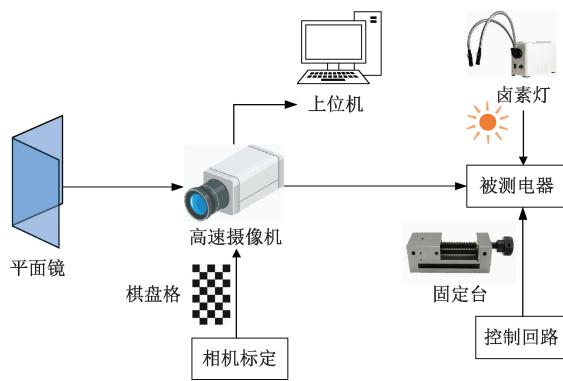


图 2 三维测试系统

Fig. 2 The illustration of three-dimensional test system

2.2 虚拟双目视觉三维重建原理

虚拟双目视觉系统利用镜面反射原理,将原本单一的视觉扩展为两个对称的虚拟视角,系统所采集到的图像能够模拟双目视觉中的左视图和右视图,为后续的图

像处理与三维重建提供基础条件。图 3 为摄像机成像及坐标系。

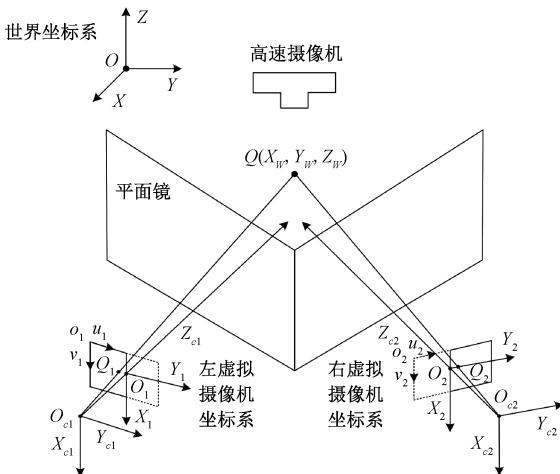


图 3 摑像机成像及坐标系

Fig. 3 Camera imaging and coordinate system

图 3 中, $o_1u_1v_1$ 和 $o_2u_2v_2$ 分别为左、右虚拟摄像机图像坐标系, $O_1X_1Y_1$ 和 $O_2X_2Y_2$ 分别为左、右虚拟摄像机成像平面坐标系, $O_{c1}X_{c1}Y_{c1}Z_{c1}$ 和 $O_{c2}X_{c2}Y_{c2}Z_{c2}$ 分别为左、右虚拟摄像机坐标系。假设 Q 点在 $OXYZ$ 世界坐标系下的坐标为 (X_w, Y_w, Z_w) , 在左虚拟摄像机图像坐标系的坐标投影为 $Q_1(u_1, v_1)$, 在右虚拟摄像机的图像坐标投影 $Q_2(u_2, v_2)$; Q_1 点在左虚拟摄像机下的坐标为 (x_1, y_1, z_1) , Q_2 点在右虚拟摄像机下的坐标为 (x_2, y_2, z_2) ; O_1 是在左虚拟图像坐标系下的坐标为 (u'_1, v'_1) , O_2 是在右虚拟图像坐标系下的坐标为 (u''_1, v''_1) 。

根据摄像机成像原理,得到世界坐标系下 Q 点的三维坐标 (X_w, Y_w, Z_w) 与在左虚拟摄像机图像坐标系下的二维像素坐标 (u_1, v_1) 之间的关系为:

$$Z_1 \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1/dx & 0 & u'_1 & 0 \\ 0 & f_1/dy & v'_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}' & \mathbf{T}' \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

对于右虚拟摄像机,该关系为:

$$Z_2 \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_2/dx & 0 & u''_1 & 0 \\ 0 & f_2/dy & v''_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}'' & \mathbf{T}'' \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, Z_1, Z_2 为不等于 0 的比例因子, f_1, f_2 为左右虚拟摄像机的焦距, $\mathbf{R}', \mathbf{R}''$ 为左、右虚拟摄像机的旋转矩阵,是 3×3 的正交矩阵, $\mathbf{T}', \mathbf{T}''$ 为左、右虚拟摄像机平移

矩阵, 是 3×1 的列向量。 dx 和 dy 为像素在 x 、 y 方向上所对应的真实物理尺寸。

分别展开左、右虚拟摄像机的旋转矩阵和平移矩阵, 如式(3)和(4)所示。

$$Z_1 \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1/dx & 0 & u'_0 & 0 \\ 0 & f_1/dy & v'_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r'_{11} & r'_{12} & r'_{13} & t'_1 \\ r'_{21} & r'_{22} & r'_{23} & t'_2 \\ r'_{31} & r'_{32} & r'_{33} & t'_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m'_{11} & m'_{12} & m'_{13} & m'_{14} \\ m'_{21} & m'_{22} & m'_{23} & m'_{24} \\ m'_{31} & m'_{32} & m'_{33} & m'_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$Z_2 \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_2/dx & 0 & u''_0 & 0 \\ 0 & f_2/dy & v''_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} r''_{11} & r''_{12} & r''_{13} & t''_1 \\ r''_{21} & r''_{22} & r''_{23} & t''_2 \\ r''_{31} & r''_{32} & r''_{33} & t''_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} m''_{11} & m''_{12} & m''_{13} & m''_{14} \\ m''_{21} & m''_{22} & m''_{23} & m''_{24} \\ m''_{31} & m''_{32} & m''_{33} & m''_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

倘若已知一个特征点在左右视图中对应的二维像素坐标, 那么就可以基于双目成像原理, 建立关于求解该点三维坐标矩阵方程, 从而求解该点基于世界坐标系下的

三维坐标。根据式(3)和(4), 消去比例因子可获得对应点的三维空间坐标如式(5)所示。

$$\begin{bmatrix} u_1 m'_{31} - m'_{11} & u_1 m'_{32} - m'_{12} & u_1 m'_{33} - m'_{13} \\ v_1 m'_{31} - m'_{21} & v_1 m'_{32} - m'_{22} & v_1 m'_{33} - m'_{23} \\ u_2 m''_{31} - m''_{11} & u_2 m''_{32} - m''_{12} & u_2 m''_{33} - m''_{13} \\ v_2 m''_{31} - m''_{21} & v_2 m''_{32} - m''_{22} & v_2 m''_{33} - m''_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m'_{14} - u_1 m'_{34} \\ m'_{24} - v_1 m'_{34} \\ m''_{14} - u_2 m''_{34} \\ m''_{24} - v_2 m''_{34} \end{bmatrix} \quad (5)$$

3 双断点电器触头三维运动轨迹测量方法

通过搭建的三维测试系统对双断点电器触头运动过程展开测量, 并基于 OpenCV 设计了标记点质心坐标的自动提取算法, 对触头在开断过程中的空间位移进行自动提取, 获得的三维轨迹数据用于分析触头的运动规律与偏移特性, 为双断点电器的性能评估提供了可靠的数据支撑。

3.1 摄像机标定

首先采用张正友标定法进行摄像机系统标定, 获得摄像机内外部参数^[17]。标定板为标准棋盘格图案, 单个格子的边长为 8 mm, 角点列阵为 5×11。实验中利用 MATLAB 标定工具箱, 分别对摄像机采集的 15 张棋盘格图像进行标定, 摄像机所标定的结果参数如表 1 所示。

表 1 虚拟双目摄像机标定参数

Table 1 Calibration parameters of virtual stereo camera

类别	焦距(f_x, f_y)	主点(c_1, c_2)	畸变参数(k_1, k_2, p_1, p_2, k_3)	旋转矩阵 $R_{3 \times 3}$	平移矩阵 $T_{3 \times 1}$
左摄像机	(1 646.721 5, 1 647.759 6)	(235.397 8, 214.626 3)	(0.188 9, 1.533 3, 0.000 6, 0.014 0, 0.000 0)	$\begin{bmatrix} 0.034 & 0 & 0.889 & 0 & 0.456 & 7 \\ 0.978 & 6 & 0.063 & 0 & -0.195 & 7 \\ -0.202 & 8 & 0.453 & 6 & -0.867 & 8 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -51.682 & 4 \\ 24.685 & 4 \\ 720.110 & 0 \end{bmatrix}$
右摄像机	(1 706.481 7, 1 698.856 2)	(335.654 4, 191.639 3)	(0.191 7, 2.470 1, 0.005 9, 0.003 8, 0.000 0)	$\begin{bmatrix} -0.081 & 0 & 0.889 & 9 & -0.448 & 9 \\ 0.974 & 0 & -0.025 & 0 & -0.225 & 3 \\ -0.211 & 7 & -0.455 & 5 & -0.864 & 7 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 39.017 & 5 \\ 42.610 & 8 \\ 763.327 & 8 \end{bmatrix}$

3.2 双断点电器触头运动过程测试

为了能对触头动作过程进行测试, 特征点识别与检测尤为重要。通过对标记点进行图像处理, 获取一系列像素坐标, 并结合摄像机的内外参数实现三维重建。为了表征双断点继电器触头的运动状态, 在两个动触头上分别设置标记点作为特征点, 用来追踪触头的运动轨迹。

考虑到标记点的多样性, 其中圆形标记点具有检测稳定、抗环境干扰能力强等优势。因此本文选择圆形标记点作为实验对象, 处理后的继电器如图 4 所示, 其中 x 、 y 、 z 分别表示触头运动方向。

为了避免继电器在动作过程产生振动或位移, 影响触头运动轨迹测量的准确性, 对继电器进行固定, 以确保其在测试过程中的稳定性。实验现场布置如图 5 所示。

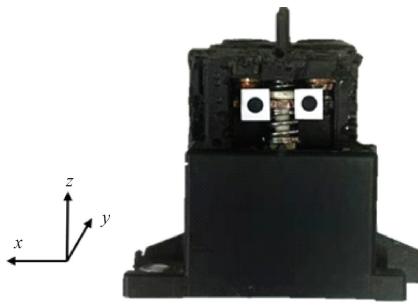


图 4 继电器结构及圆形标记点

Fig. 4 Relay structure and circular marking points

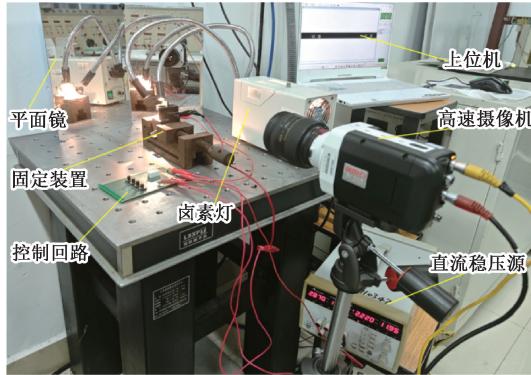


图 5 实验现场

Fig. 5 On-site experimental setup

通过单片机控制继电器接通和分断,摄像机系统拍摄触头动作过程的标记点图像,得到的部分图像如图 6 所示。

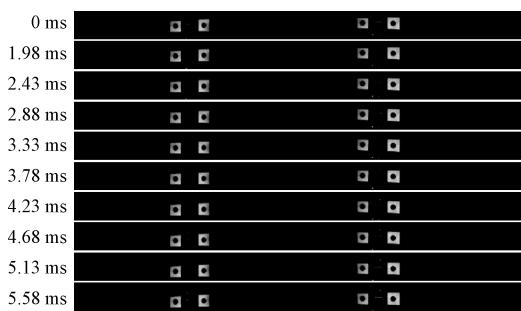


图 6 触头运动过程的标记点部分图像

Fig. 6 A subset of images of marked points during contact movement process

3.3 基于 OpenCV 的标记点质心坐标自动提取算法

1) 算法步骤

由于高速摄像机拍摄得到的触头动作过程图像数量很多,采用 Image-pro plus 软件进行手动提取标记点质心坐标存在明显弊端。此方法高度依赖人工操作,面对图像数量较大时,不仅效率极低,而且耗时长,容易使操作

产生视觉疲劳和判断偏差^[18]。针对上述问题,利用 PyCharm 软件,设计了一种高效、自动化的图像处理算法,对左右镜面上特征标记点进行识别和分析,提取面积及质心等关键参数,处理流程如图 7 所示。主要包括图像采集、图像预处理、图像阈值化处理、Canny 边缘检测获取、轮廓面积阈值筛选、目标轮廓获取、质心点坐标提取和质心坐标输出。

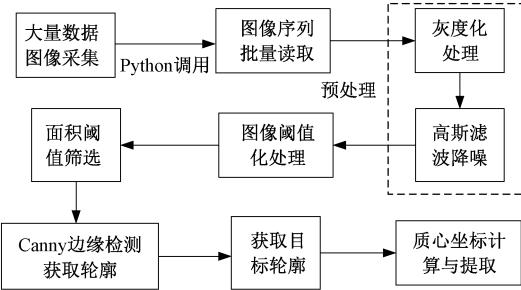


图 7 处理流程

Fig. 7 Processing procedure

2) 预处理

在继电器触头运动的过程中,高速摄像机捕获大量的图像序列,每帧图像对应每一时刻的瞬时位置,通过这些图像对继电器进行动态分析。图像预处理通常包括灰度化和高斯滤波两个步骤。灰度化处理能够有效削弱拍摄过程中引入的干扰因素,如外部环境中的高斯噪声或一些随机噪声。高斯滤波则利用二维的高斯函数生成滤波核,对图像进行平滑处理。二维的高斯函数的表达式为:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

其中, $G(x, y)$ 是滤波核的权重值, x, y 是数据离散点的坐标; σ 是高斯的标准差,决定高斯的平滑程度。

3) 图像阈值化

在 OpenCV 中,阈值法是图像分割的一种常用的方法,主要对图像的灰度值进行划分,灰度值在同一个灰度范围内认为具有一定的相似性。用 $f(x, y)$ 表示输入图像在像素点 (x, y) 的灰度值,设定合适的阈值 T ,通过比较每个像素的灰度值与阈值的大小,将像素分为目标和背景图像。阈值法的数学表达式如式(7)所示。

$$g(x, y) = \begin{cases} 255, & f(x, y) \geq T \\ 0, & f(x, y) < T \end{cases} \quad (7)$$

其中, $g(x, y)$ 表示输出图像的灰度值, $g(x, y) = 255$ 表示输出目标图像; $g(x, y) = 0$ 表示背景图像。通过阈值化的方法既可以有效的去除噪声,又可以过滤图像中很小或者很大的像素污点。

4) 边缘轮廓绘制

Canny 算法是一种经典的边缘检测算法,广泛应用于图像处理领域。首先通过高斯滤波对图像进行平滑处

理, 消除噪声影响, 减少伪边缘的产生。然后结合 2×2 的邻域模板计算水平和垂直方向的梯度, 获得图像的梯度幅值和方向信息。沿梯度方向对梯度幅值进行非极大值的抑制, 并保留局部梯度幅值的极大值点, 从而精准定位边缘位置。再采用双阈值方法对边缘进行检测, 设置高低两个阈值, 低阈值用于连接边缘, 高阈值用于确定边缘的初始位置。最后采用连接方法消除弱边缘并实现断续强边缘的连接。

5) 轮廓面积筛选

在进行 Canny 边缘检测之后, 需使用 OpenCV 中 `findContours` 函数找到每个轮廓的信息, 每个轮廓都是由一组的连接点所构成。每个轮廓面积代表了轮廓所界定区域的像素数量, 是衡量一种像素区域大小的重要指标。

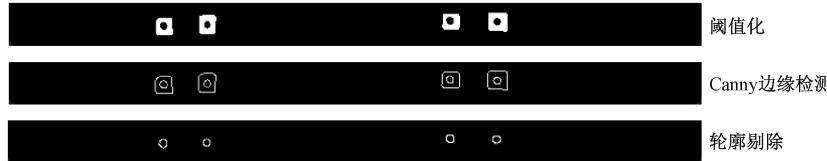


图 8 各阶段图像处理结果对比

Fig. 8 Comparison of image processing results at each stage

6) 质心点坐标获取

设一幅图像的离散二维灰度密度函数 $I(x, y)$, 点 (x, y) 处的 $p+q$ 阶矩可用式(10)表示。特别地, p, q 同时为 0 时, M_{00} 表示目标轮廓的面积。

$$M_{pq} = \sum_{x=1}^i \sum_{y=1}^j x^p y^q I(x, y) \quad (10)$$

根据式(11)可计算质心的坐标 (\bar{x}, \bar{y}) , 即:

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{M_{10}}{M_{00}} \\ \bar{y} = \frac{M_{01}}{M_{00}} \end{cases} \quad (11)$$

其中, M_{10} 和 M_{01} 为轮廓的一阶矩, 表示轮廓内所有像素点 x 和 y 坐标在灰度值下的加权和。

在图像序列中自动逐帧提取电器触头运动过程中标记点的质心坐标, 以此表征标记点在各时刻的位置。结合左右镜面中标记点的一一对应关系, 并基于虚拟视觉的三维重建原理, 可进一步计算得到电器触头标记点的空间坐标以及其三维运动轨迹。

3.4 准确性验证

为了验证摄像机标定参数的精度与三维重建的可靠性, 以实验样件为测量对象进行实验验证。通过已标定完成的摄像机系统, 对实验样件进行多次图像采集和测量。样件的角点选定如图 9 所示。其中数字 1~6 分别为长方体样件的 6 个顶角。

在 OpenCV 中, `contourArea` 函数用于计算一个轮廓的面积, 其原理基于格林定理, 将曲线积分转换为曲线所围成的面积计算, 即:

$$A = \frac{1}{2} \oint_D (x dy - y dx) \quad (8)$$

其中, A 是由闭合曲线 D 所围区域的面积; x, y 是曲线上的点的坐标; dx, dy 是曲线上的微分。

$$A \approx \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (9)$$

通过过滤掉一些不必要的轮廓面积, 提取如图所示的特征标记点, 并使用 OpenCV 中的 `drawContours` 函数画出其标记点的轮廓信息。

各阶段图像处理结果对比如图 8 所示。



图 9 样件的角点选定

Fig. 9 Corner selection of the specimen

通过对样件角点的采集, 得到角点在左右虚拟摄像机下的像素坐标。并根据摄像机所标定完成的参数, 求出世界坐标系下各个角点真实的物理坐标, 随后计算得到样件的实际边长, 结果汇总于表 2。同时, 为验证准确性, 使用游标卡尺对样件各边长进行多次测量并取平均值, 也列于表 2 中。

表 2 三维测试的准确度

Table 2 Accuracy of 3D measurement

区域	三维重构/mm	实测/mm	绝对误差/mm	相对误差/%
1~2	37.739	37.82	0.081	0.21
2~3	14.118	14.01	0.108	0.77
3~4	38.113	37.82	0.293	0.78
1~4	13.410	14.01	0.600	4.28
4~5	28.238	28.91	0.672	2.33
5~6	37.707	37.82	0.113	0.30
3~6	28.963	28.91	0.053	0.18
平均误差				1.26

如表 2 所示,通过三维重构的尺寸与实测结果高度一致。摄像机系统误差主要来源于图像采集质量、图像角点的提取精度等问题,多数区域边长相对误差低于 1%,最大误差为 4.28%,系统整体平均误差为 1.26%,测试结果验证了该测量系统具有较高精度,可用于后续双断点电器的动态三维测试。

4 触头三维运动轨迹测量结果与可视化分析

4.1 三维运动轨迹测量结果分析

采用 OpenCV 提取得到运动过程中的大量像素坐标,并利用相应的参数矩阵将其转换为世界坐标(以标定板常规单位作为坐标单位),可以获取继电器在闭合和分断过程中不同时刻的 x 、 y 、 z 这 3 个方向的位移。基于所得到的世界坐标数据,进一步绘制出位移与时间的关系曲线(如图 10 和 11 所示)以及主运动方向(z 方向)的速度-时间曲线(如图 12 所示)。

从图 10~12 中可以看到继电器闭合工作过程中,沿 z 轴主运动方向出现了左右触头明显的不同步动作现象。具体表现为:左触头开距为 1.83 mm,右触头开距为 2.02 mm,左触头闭合时间为 11.94 ms,右触头则为 12.16 ms。这种不同步可能导致闭合过程左右触头受力

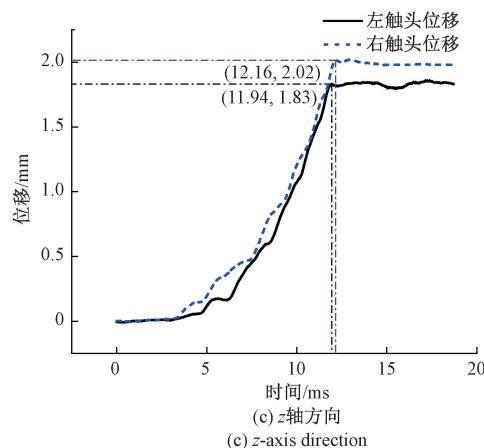
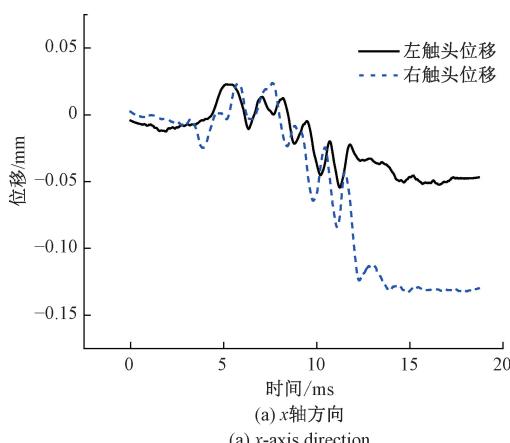


图 10 闭合过程左右触头 3 个方向的位移与时间关系

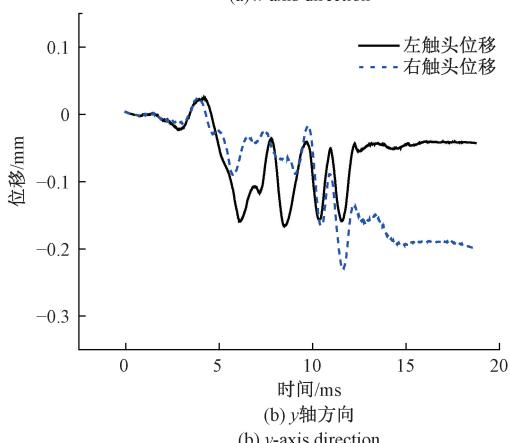
Fig. 10 Displacement versus time of left and right contacts during closing

不均,进而使左触头的磨损程度大于右触头。在 x 和 y 轴方向上也观察到触头偏移现象,其中 x 方向左触头最大偏移量为 -0.05 mm,右触头 -0.13 mm; y 方向左触头最大偏移量为 -0.17 mm,右触头为 -0.23 mm。

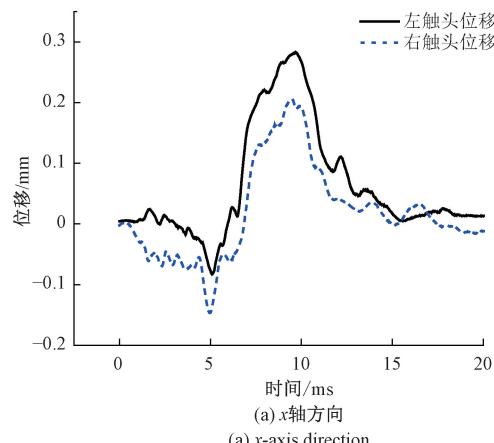
继电器在分断过程中也呈现明显的不同步特性。如图 10 所示,沿 z 轴主方向左触头分断位置在 -2.02 mm,而右触头分断位置在 -1.93 mm。在 x 与 y 轴方向亦出现



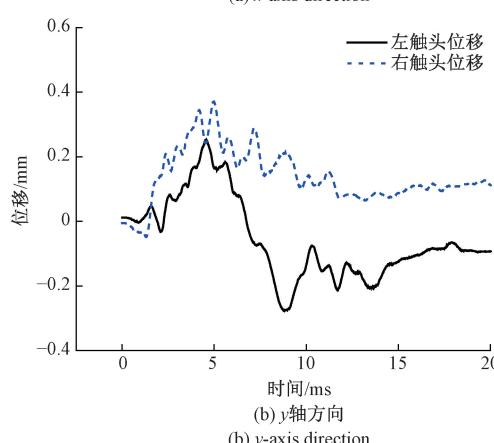
(a) x 轴方向
(a) x -axis direction



(b) y 轴方向
(b) y -axis direction



(a) x 轴方向
(a) x -axis direction



(b) y 轴方向
(b) y -axis direction

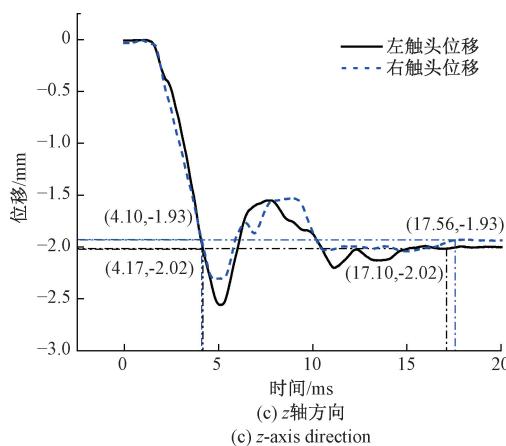


图 11 分断过程左右触头 3 个方向位移与时间关系

Fig. 11 Displacement versus time of left and right contacts during breaking

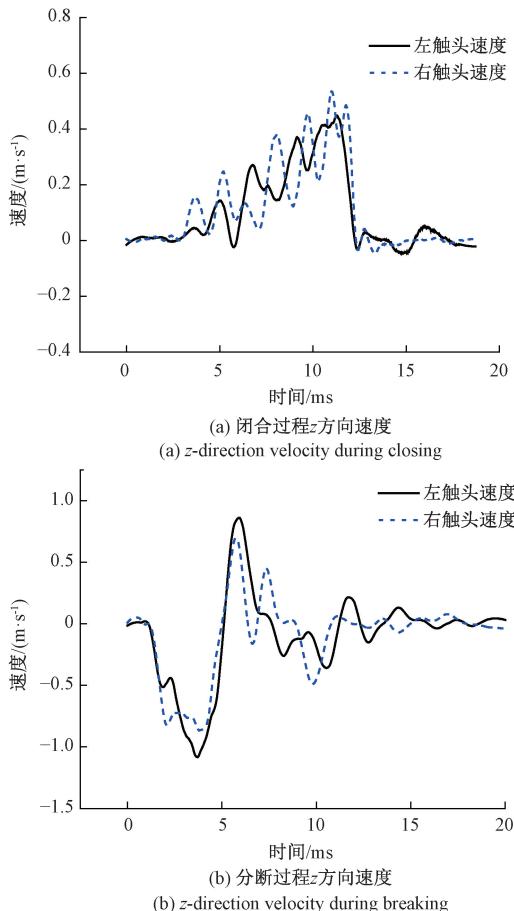


图 12 主运动方向的速度

Fig. 12 Speed in the main motion direction

偏移现象。其中 x 方向上左触头的最大偏移量为 0.28 mm , 右触头为 0.20 mm ; y 方向上左触头的最大偏移量为 -0.27 mm , 而右触头则为 0.37 mm 。除此之外, 分断过程与闭合过程的触头行程存在差异, 说明每次闭合分断操作后触头没有回到初始位置。

上述结果表明继电器在闭合过程中触桥存在明显的倾斜和横向偏移, 造成双触头不同步闭合和不对称冲击, 从而引发结构振动, 影响其工作稳定性。而在分断过程中也伴随位置上的偏移, 进一步凸显了其运动的不平衡性。

4.2 基于三维测试的双断点电器可视化分析

为探究左右触头在工作过程中产生偏移的原因, 需要对触头的运动状态进行可视化分析。根据实际继电器的结构尺寸, 利用 SolidWorks 构建了继电器的各零件的三维模型, 并按其配合关系进行装配, 得到装配体图形如图 13 所示。

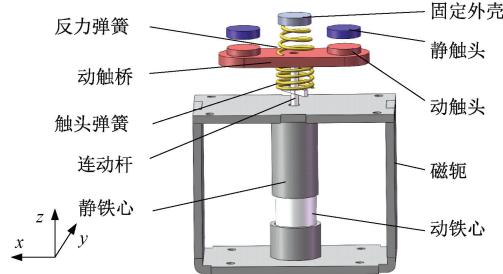


图 13 继电器装配体模型结构

Fig. 13 Relay assembly model structure

在 SolidWorks 的 motion 模块, 通过对动触头赋予实际测得的三维位移曲线, 实现继电器运动过程的可视化动态模拟, 复现其运动过程。这种可视化模拟可形象地展示继电器内部的工作过程, 有助于直观理解其动态特性。图 14 表示继电器分断状态, 其中实线表示固定零件 (如静触头或外壳) 的中心线, 作为参考线; 虚线表示动触头的中心线。

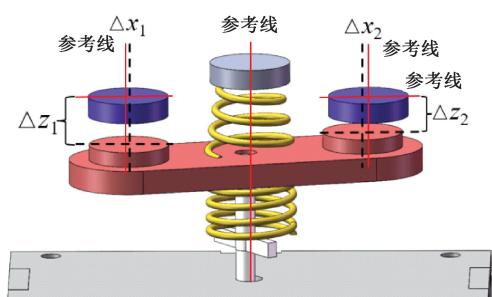
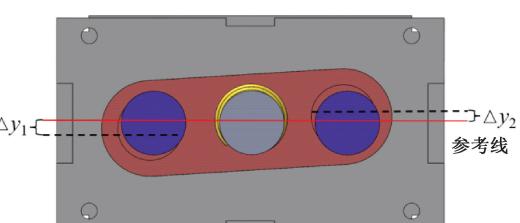
(a) x 和 z 方向上的偏移
(a) Deviation in the x and z directions(b) y 方向上的偏移
(b) Deviation in the y-direction

图 14 继电器触头运动偏移的可视化

Fig. 14 Visualization of relay contacts offset movement

从图 14 中可以看到两个动触头在 x 和 y 方向上均存在偏移, z 轴主运动方向上的开距不一致, 表明双触头在动作过程中存在不同步性。以固定外壳为中心线为参考, 可以看出连动杆也存在明显的偏移现象。

倘若连动杆结构间隙过大, 动作时易产生摆动, 导致触桥随机性偏移。若弹簧中心轴线偏移将导致触桥倾斜、进而引起双触头接触压力不均或分断不同步等问题。基于三维可视化的测试结果, 能够直观展示动触头、连动机构及触头在通断的空间运动特性, 使微小偏移、倾斜和非线性位移趋势得以清晰呈现。可进一步推断关键部件的磨损规律与寿命衰减趋势, 从而实现对电器剩余寿命的预测。

5 结 论

1) 利用单台高速摄像机及两面平面镜, 基于虚拟双目视觉原理构建了三维动态特性测试系统, 并进行了准确性验证。结果显示三维重建最大误差为 4.28%, 系统整体平均误差控制在 1.26%, 体现了测量的稳定性和准确性。

2) 通过在电器触桥两端设置标记点, 利用高速摄像机进行采集标记点图像, 提出了基于 OpenCV 图像处理算法, 该算法通过自动化处理流程, 有效避免传统图像分析软件中依赖人工操作所引起的主观误差与效率低下等问题。通过对标记点位置的跟踪与坐标计算, 结合三维重建技术, 得到其三维不平衡运动特性曲线, 实现对继电器双触头运动状态的监测。

3) 通过 SolidWorks 可视化模拟继电器内部结构运动过程, 有助于直观展示动触头在闭合与分断过程中的三维运动轨迹。通过赋予动触头实际的位移曲线, 可有效识别由于弹簧不对称、导向间隙或装配偏差等因素引起的运动偏移问题, 为继电器设计优化和寿命预测提供重要依据。

本研究提出的测量方法具有良好的通用性, 可广泛应用于各类有触点电器(如接触器、断路器等)的动态特性监测与评估。

参考文献

- [1] 吴敬轩, 许志红. 电磁接触器吸合过程无模型自适应控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1663-1673.
WU J X, XU ZHI H. A model-free adaptive control strategy for actuation of electromagnetic contactors [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1663-1672.
- [2] WANG Y, LIANG H M, WEI Z T, et al. Establishment and application of rebound dynamics model for high-voltage DC contactor [C]. IEEE Holm Conference on

Electrical Contacts, 2023: 1-8.

- [3] 李静, 袁志曹, 曹云东, 等. 触头运动特性对直流接触器开断性能影响 [J]. 电机与控制学报, 2023, 27(11): 79-89.
LI J, YUAN ZH C, CAO Y D, et al. Influence of contact motion characteristics on breaking performance of DC contactors [J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(11): 79-89.
- [4] CUI X L, ZHOU X, ZHAI G F, et al. Electrical lifespan prediction of HVDC relay based on the accumulated arc erosion mass [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2018, 8(3): 356-363.
- [5] 李奎, 张月, 姜惠, 等. 基于触头形貌特征的低压直流断路器可靠性评估 [J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(12): 118-128.
LI K, ZHANG Y, JIANG H, et al. Reliability assessment of low-voltage DC circuit breaker based on morphological characteristics of contacts [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(12): 118-128.
- [6] 曹启纯, 刘向军. 直动式双断点继电器不平衡燃弧现象研究 [J]. 电器与能效管理技术, 2018(24): 7-12.
CAO Q CH, LIU X J. Study on unbalanced arcing phenomena in direct-motion double-break relay [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2018(24): 7-12.
- [7] 黄兴泉, 王伟, 张欲晓, 等. 断路器机械特性的高速摄像法检测 [J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2011, 38(5): 43-47.
HUANG X Q, WANG W, ZHANG Y X, et al. Mechanical properties detection of circuit breaker by high speed digital camera method [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2011, 38(5): 43-47.
- [8] 袁永明, 施珮. 基于图像处理的鱼群运动监测方法研究 [J]. 南方水产科学, 2018, 14(5): 109-114.
YUAN Y M, SHI P. Study on fish movement monitoring method based on image processing [J]. South China Fisheries Science, 2018, 14(5): 109-114.
- [9] 王金栋, 谢成胜, 张行健, 等. 机器人搭载双目视觉系统下的工件尺寸检测方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(3): 180-192.
WANG J D, XIE CH SH, ZHANG X J, et al. Research on workpiece size detection method with binocular vision system carried by robot [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(3): 180-192.
- [10] ZHANG SH F, LI B, FU SH R, et al. High-precision measurement of binocular telecentric vision system with

- novel calibration and matching methods[J]. IEEE Access, 2019, 7: 54682-54692.
- [11] YAN G Z, ZHANG J, CHENG ZH, et al. Geometric calibration of rotational vision system for dynamic exterior orientation[J]. Instrumentation, 2023, 10(3): 23-33.
- [12] 庄苏峰,屠大维,张旭,等. 水下双目立体视觉对应点匹配与三维重建方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5): 147-154.
- ZHUANG S F, TU D W, ZHANG X, et al. Research on corresponding point matching and 3D reconstruction of underwater binocular stereo vision[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(5): 147-154.
- [13] 蔡锦涛,赵立宏,叶佳伟,等. 基于双目视觉的电缆空间位置测量系统[J]. 自动化与仪表, 2025, 40(6): 84-88.
- CAI J T, ZHAO L H, YE J W, et al. Cable spatial position measurement system based on binocular vision[J]. Automation & Instrumentation, 2025, 40(6): 84-88.
- [14] 李湘平,鲁军勇,张晓,等. 脱壳弹弹托分离的双目视觉测量[J]. 国防科技大学学报, 2023, 45(1): 150-156.
- LI X P, LU J Y, ZHANG X, et al. Binocular vision measurement of sabot discard of shell piercing projectile[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2023, 45(1): 150-156.
- [15] 王紫正,宋晓通,刘欣博,等. 基于双目视觉的断路器运动特性检测技术[J/OL]. 高电压技术, 1-14 [2025-09-01].
- WANG Z ZH, SONG X T, LIU X B, et al. Motion characteristics detection of breaker based on binocular vision[J/OL]. High Voltage Engineering, 1-14 [2025-09-01].
- [16] 兰太寿,李炜荣,刘向军. 基于虚拟双目视觉的电器电磁机构三维动态测试研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(1): 29-35.
- LAN T SH, LI W R, LIU X J. Three-dimensional dynamic test research for electromagnetic mechanism of electrical apparatus based on virtual binocular vision[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(1): 29-35.
- [17] LIU D, ZHANG R, ZHANG J, et al. Constructing a virtual large reference plate with high-precision for calibrating cameras with large FOV[J]. Instrumentation, 2023, 10(2): 1-8.
- [18] 宋迪迪,张根广,张宇卓,等. Image-pro plus 软件在泥沙絮凝体结构特征分析中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(4): 156-161.
- SONG D D, ZHANG G G, ZHANG Y ZH, et al. Application of Image-pro plus in analysis of sediment flocculation structure[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2018, 29(4): 156-161.

作者简介



邓传传,2022 年于安徽科技学院获得学士学位,现为福州大学硕士研究生,主要研究方向为电器三维测试与图像处理技术。

E-mail:chuanchuandeng@163.com



Deng Chuanchuan received his B. Sc. degree from Anhui University of Science and Technology in 2022. He is currently pursuing his M. Sc. degree at Fuzhou University. His main research interests include 3D testing and image processing technology for electrical appliances.

刘向军(通信作者),分别于 1993 年、1996 年、2001 年在福州大学获得学士学位、硕士学位和博士学位,现为福州大学副教授,主要研究方向为智能电器及其在线监测技术、电弧和电接触仿真技术。

E-mail:liuxj@fzu.edu.cn

Liu Xiangjun (Corresponding author) received her B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Fuzhou university in 1993, 1996 and 2001, respectively. She is currently an associate professor at Fuzhou University. Her main research interests include intelligent electrical appliances and their online monitoring technology, simulation technology for electric arc and electrical contact.