

同轴热电偶结构外径高精度视觉测量方法

张雁恒^{1,2}, 袁君^{1,3}, 胡守超^{1,2}, 支冬^{1,2}, 陈苏宁^{1,2*}

(1. 中国空气动力研究与发展中心 超高速空气动力研究所, 四川 绵阳 621000;

2. 飞行器流体物理全国重点实验室, 四川 绵阳 621000; 3. 西南科技大学 材料与化学学院, 四川 绵阳 621000)

摘要: 同轴热电偶是超高速飞行器地面风洞测热试验的核心传感器之一, 传感器自身的同轴装配质效及其与飞行器模型适配质量决定了气动热测量可靠性, 因此, 传感器结构外径的高精度测量至关重要。提出了一种基于机器视觉技术的传感器结构外径高精度测量方法, 通过相机及双远光镜头获取图像, 并基于双边滤波、二值化处理、亚像素边缘检测定位及边缘直线拟合计算外径尺寸。传感器样品外径尺寸的测量实验证明了该方法简单高效且平均绝对误差低至 $0.6\ \mu\text{m}$, 测量精度满足工程应用需求。

关键词: 同轴热电偶; 机器视觉; 边缘检测; 图像处理; 结构外径

中图分类号: V211

文献标识码: A

doi: 10.62756/csjs.1671-7449.2025071

引用格式: 张雁恒, 袁君, 胡守超, 等. 同轴热电偶结构外径高精度视觉测量方法[J]. 测试技术学报, 2025, 39(6): 689-695.

ZHANG Yanheng, YUAN Jun, HU Shouchao, et al. High precision vision measurement method of coaxial thermocouple structural diameter[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(6): 689-695.

High Precision Vision Measurement Method of Coaxial Thermocouple Structural Diameter

ZHANG Yanheng^{1,2}, YUAN Jun^{1,3}, HU Shouchao^{1,2}, ZHI Dong^{1,2}, CHEN Suyu^{1,2*}

(1. Hypervelocity Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China;

2. National Key Laboratory of Aerospace Physics in Fluids, Mianyang 621000, China;

3. School of Materials and Chemistry, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, China)

Abstract: Coaxial thermocouple is one of the key sensors for the heat test of hypersonic aircraft in wind tunnel. The reliability of aerodynamic heat test is determined by the quality of sensor coaxial assembly and its adaptation quality with aircraft model, so it is very important to measure the outer diameter of the sensor structure with high precision. In this paper, a high-precision measurement method of sensor structural diameter based on machine vision technology is proposed. The image was obtained by a camera and a double telecentric lens, and the outer diameter was calculated based on bilateral filtering, binary processing, sub-pixel edge detection and edge straight line fitting. The measurement experiment of sensor sample outer diameter proves that this method is simple and efficient with an average absolute error as low as $0.6\ \mu\text{m}$, so the measurement accuracy meets the engineering application requirements.

Key words: coaxial thermocouple; machine vision; edge inspection; image processing; structural diameter

收稿日期: 2024-11-30

基金项目: 中国空气动力研究与发展中心超高速空气动力研究所自主发展项目(KT-ZZFZ-2024-017-03)

作者简介: 张雁恒(1992-), 男, 工程师, 博士, 主要从事激波风洞瞬态气动热测量技术及应用研究。E-mail: 892641793@qq.com。

* 通信作者: 陈苏宁(1990-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事激波风洞瞬态气动热测量技术及应用研究。E-mail: chensy_hh@163.com。

0 引言

在航空航天领域,超高速飞行器表面气动热环境的准确测量或预测主要通过地面风洞测热试验来实现^[1-4],而同轴热电偶已经发展成为飞行器模型表面热流测量的核心传感器之一^[5-6]。同轴热电偶是由不同材质的电极丝和电极管通过同轴装配形成,且利用电极丝表面的绝缘漆层保持丝管间绝缘,这种结构可利用端面热接点的热电效应实现瞬态温度的快速测量,具有稳定性好、量程大、反应快、灵敏度高、精度高及简单可靠的优点^[7]。在工程应用中,一般将同轴热电偶传感器插入模型内部预制通孔并使其测量端与模型表面保持平齐,且传感器与孔壁之间缝隙越小越好,以保证飞行器模型的气动外形不受破坏。

在同轴热电偶生产过程中,电极丝与电极管的同轴装配一般是通过丝管间相对运动实现,而且完成装配的同轴热电偶外径一般在1~3 mm之间,而丝管间隙一般在0.01 mm左右,因而基于电极丝外径及电极管内孔径高精度测量而开展的品质检验对于保证丝管装配效率和装配质量至关重要。另外,批量生产的同轴热电偶尤其电极管本身也可能存在外径过大或过小导致装配质量出现问题而干扰飞行器模型气动外形^[1,5]。目前,传感器丝管结构外径的测量以传统接触式机械设备(高精度数显千分尺)测量为主,电极管内孔径的测量在工程实践中主要利用标准塞规来完成,而电极丝由于直径较小一般不做外径测量,虽然整体能满足装配需求,但存在人工介入程度高、效率低、劳动强度大、干扰误差较大、零件损耗较多等问题,制约着同轴热电偶传感器的生产检验质效,从而影响超高速风洞测热试验效率且可能导致超高速气动热测量数据存在误差。因此,发展兼顾热流传感器测量精度与检测效率的新方法具有重要的工程应用价值。

机器视觉技术具有无损非接触、快速高精度、安全可靠、重复性好及性能稳定等优点^[8-11]。近年来,基于机器视觉技术的零部件结构尺寸精密测量方法被广泛应用于航空航天和智能制造等领域,既兼顾测量效率与精度,又便于操作与迭代升级,成为当前国内外工业领域的重要研究方向^[12-16]。王锐锋等^[12]搭建了一种基于机器视觉技术的直轴零件直径测量装置,针对直径5~

100 mm的直轴零件,直径的最大测量误差不超过22 μm 。Sun等^[13]提出一种基于数字图像处理技术的非接触式高精度测量轴直径的方法,针对直径20~30 mm梯度变化的直轴零件,平均测量误差低至5 μm 。石照耀等^[14]研制了一种小尺寸轴类零件快速测量机,实现了零件内径和长度的在线快速测量,重复性误差为5 μm 。李学哲等^[15]提出一种基于2D激光测量和全量程标定校准的轴径精密在线测量方法,针对直径25 mm的标准芯轴测量误差低至1%,但其测量过程复杂且设备成本高。Yang等^[16]提出了结合线结构光和深度学习的方法,针对直径10~18 mm零件的测量误差小于17 μm ,但该方法存在设备成本高且测量周期长等问题。Gao等^[17]提出了一种基于双光束投影实现大尺寸轴径自动测量的新方法,重复性误差低至7 μm ,但该方法所用设备复杂且成本相对较高。综上所述,已有测量方法存在测量系统相对复杂、设备成本相对较高、外径测量精度不够等问题而无法实现直径不超过3 mm的电极丝和电极管外径测量需求。因此,亟需发展一种可实现同轴热电偶结构外径高精度快速测量方法以保证热流传感器的生产质效及其在飞行器模型表面的装配质量。

本文针对热流传感器自身及其与飞行器模型适配检验质效不足的问题,提出了一种基于机器视觉技术的同轴热电偶结构外径高精度非接触式测量方法。该方法使用高分辨率CMOS相机结合远心镜头,实时获取结构零件图像,并对图像进行双边滤波、二值化预处理操作,进一步通过亚像素边缘定位及边缘直线拟合测算结构件的外径尺寸。

1 测量系统设计

同轴热电偶结构外径高精度测量装置示意图如图1所示。硬件设备主要包括工业相机、远心镜头、增倍镜、LED阵列面光源、透明玻璃工作台和计算机。

为了实现同轴热电偶结构尺寸的高精度测量,测量装置中的成像设备采用海康威视CMOS工业相机(型号MV-CE120-10UC),感光芯片尺寸为1/1.7英寸,分辨率4 000×3 036,像元尺寸1.85 μm 。配套镜头采用微视图像双远心镜头(型号BT-2307),靶面尺寸为2/3英寸,成像畸变率小于

0.05%。为了最大限度放大有效视场中的同轴热电偶零部件(电极丝或电极管)及其装配体,镜头底部进一步加装微视图像BT-C2.0S增倍镜,放大倍数2X。因此,测量系统最终的视场参数为3 mm×2 mm,进而可得系统成像的光学分辨率为0.8 μm/Pixel。为了限定测量环境,本文装置采用微视图像高亮度LED阵列面光源(型号MV-BL28X23-V)实现均匀稳定辐照以突出被测结构的轮廓信息。

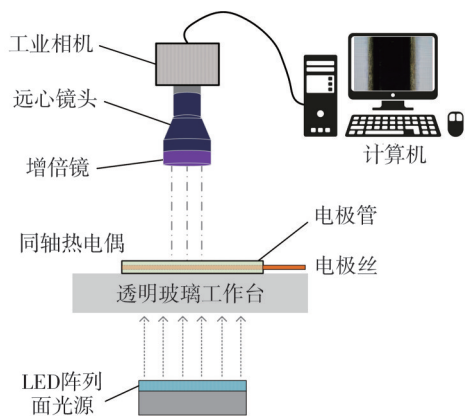


图 1 同轴热电偶结构外径测量装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of measuring device for structural diameter of coaxial thermocouple

由于双远心光学系统的成像视野是固定的,其获取图像的单个像素对应的物理尺度随之固定^[18]。因此,本文利用经典棋盘格标定板图像开展成像标定^[19],计算获得像素当量*K*与系统光学成像分辨率保持一致,即*K*=0.8 μm/Pixel,这主要是因为本文采用的双远心镜头畸变系数极低,对成像几乎不产生畸变^[20]。

2 图像处理方法

图像处理流程示意图如图 2 所示。测量装置通过工业相机采集获得同轴热电偶结构件图像信息,将图像灰度化处理后使用双边滤波过滤图像噪声并做二值化处理,之后采用基于 Zernike 矩的亚像素边缘定位算法提取图像轮廓,最后基于 Hough 变换的边缘直线拟合获得结构件外径轮廓之间的像素数量,从而换算得到外径物理尺寸。

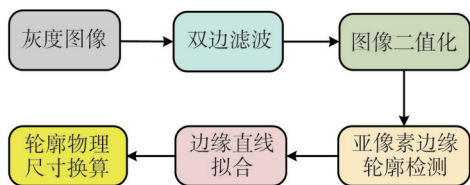


图 2 图像处理流程示意图

Fig. 2 Image processing flow chart

2.1 图像预处理

为便于亚像素边缘定位,需消除相机直接拍摄图像中的无用信息,本文首先开展图像预处理,将直接采集的原始图像转变为灰度图像,灰度图像也可以通过调节相机参数直接获取。之后,采用双边滤波过滤图像中的高斯噪声,同时保护图像边缘从而获得轮廓图像^[20]。最后,采用基于 OTSU 的大津阈值法进行图像二值化以保护边缘不受图像二值化阈值的影响^[21]。

2.2 亚像素边缘定位算法

本文采用基于 Zernike 矩的亚像素边缘定位算法,其基本原理是根据 Zernike 矩的旋转不变性计算出检测边缘所需的 4 个边缘参数,进而实现对亚像素边缘的精确定位^[22-23]。在单位圆范围内,图像灰度分布函数 $f(x, y)$ 的二维 n 阶 m 次 Zernike 矩定义表达式为

$$Z_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \iint_{x^2+y^2 \leq 1} f(x, y) V_{nm}^*(\rho, \theta) dx dy, \quad (1)$$

式中: $f(x, y)$ 为图像点 (x, y) 处的灰度值; $V_{nm}(\rho, \theta)$ 为极坐标系单位圆内 Zernike 矩的 n 阶 m 次多项式; $V_{nm}^*(\rho, \theta)$ 为 $V_{nm}(\rho, \theta)$ 的复共轭。

离散化图像 $f(x, y)$ 的积分用求和形式代替,即 $f(x, y)$ 的 Zernike 矩可表示为

$$Z_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \sum_x \sum_y f(x, y) V_{nm}^*(\rho, \theta). \quad (2)$$

Z_{nm} 旋转 φ 角度后的关系函数定义如式(3)所示,可知旋转后 Zernike 矩的幅值不变。

$$Z'_{nm} = Z_{nm} e^{-im\varphi}. \quad (3)$$

Zernike 矩亚像素边缘检测理想阶跃模型如图 3 所示。在单位圆内边缘直线 L 两侧的灰度值分别为 h 和 $h+k$, 其中 k 为灰度阶跃差值, 原点 to 直线 L 的线段长度为 l , φ 为线段 l 与 x 轴的夹角。图 3(b) 为图 3(a) 旋转后的图像。旋转前后的关系表达式为

$$Z'_{n1} = \cos(\varphi_{n1}) \text{Re}[Z_{n1}] + \sin(\varphi_{n1}) \text{Im}[Z_{n1}] + (\sin(\varphi_{n1}) \text{Re}[Z_{n1}] - \cos(\varphi_{n1}) \text{Im}[Z_{n1}])i, \quad (4)$$

式中: $\text{Re}[Z_{n1}]$ 和 $\text{Im}[Z_{n1}]$ 分别为 Z_{n1} 的实部和虚部。

基于理想阶跃模型求得旋转后不同阶次的 Zernike 矩为

$$Z'_{00} = Z_{00} = h\pi + \frac{k\pi}{2} - k \arcsin(l) - kl\sqrt{1-l^2}, \quad (5)$$

$$Z_{20} = Z'_{20} = \frac{2k}{3}l(1-l^2)^{\frac{3}{2}}, \quad (6)$$

$$Z'_{11} = Z_{11}e^{i\varphi} = \frac{2k}{3}(1-l^2)^{\frac{3}{2}}. \quad (7)$$

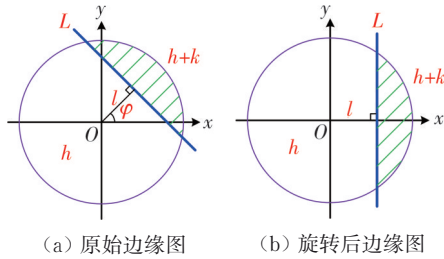


图3 Zernike矩亚像素边缘检测理想阶跃模型

Fig. 3 Ideal step model of sub-pixel edge detection by Zernike moment

根据旋转后不同阶Zernike矩可求得 φ 、 l 、 k 、 h 为

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\text{Im}[Z'_{11}]}{\text{Re}[Z'_{11}]}\right), \quad (8)$$

$$l = \frac{Z_{20}}{Z'_{11}}, \quad (9)$$

$$k = \frac{3Z'_{11}}{2(1-l^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (10)$$

$$h = \frac{Z_{00} - \frac{k\pi}{2} + k \arcsin(l) + kl\sqrt{1-l^2}}{\pi}. \quad (11)$$

由上述阶跃模型可得到边缘点的判决条件为 $k \geq K_l \cap l \leq l_l$ ， K_l 为预先设定的 k 的阈值， l_l 为预先设定的线段 l 的阈值。在图像是离散的同时为了加快计算速度，通常采用矩形模板与边缘图像进行卷积运算^[24]，因此，亚像素边缘检测坐标求解公式为

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \frac{Nl}{2} \begin{bmatrix} \cos(\varphi) \\ \sin(\varphi) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中： (x_s, y_s) 为边缘的亚像素坐标值； N 为边缘检测中采用的矩形模板大小。

2.3 边缘直线拟合

由上述Zernike矩亚像素边缘检测获得的值为边缘像素点，测算像素值需对边缘像素点进行直线检测拟合。基于Hough变换的直线检测方法是一个非常重要的检测间断点边界形状的方法^[25]，它通过将图像坐标空间变换到参数空间来实现直线拟合。但是在经过单一Hough直线检测器后，边缘像素点会出现许多单一直线，而并非只有轮廓边缘线，因此，需要对识别到的轮廓线进行直线拟合。

直线拟合采用平均拟合法进行，首先将Hough直线检测器获得的直线像素点分类，区分左右轮廓

边缘直线，而后分别计算平均端点，得到平均端点左轮廓直线 l_L 及其端点 $P_{L0}(x, y)$ 、 $P_{L1}(x, y)$ ，右轮廓直线 l_R 及其端点 $P_{R0}(x, y)$ 、 $P_{R1}(x, y)$ 。通过点斜法求得左轮廓直线 k_L 、 b_L ，右轮廓直线 k_R 、 b_R 。之后，根据点到直线的距离公式分别计算点 $P_{L0}(x, y)$ 、 $P_{L1}(x, y)$ 到右轮廓直线的距离，平均后获得平均距离 d_L ，同理可得点 $P_{R0}(x, y)$ 、 $P_{R1}(x, y)$ 到左轮廓直线的平均距离 d_R 。由于Hough直线检测器获得的直线无法保证是否平行，根据测量金字塔理论，将获得的 d_L 和 d_R 再次平均得到的距离 d_m 即认定为最终的轮廓测量像素值。最后，通过像素当量将轮廓测量像素值换算为轮廓物理尺寸。

3 实验结果与分析

3.1 实验测量结果

本文在实验中首先通过三丰高精度数显千分尺(型号MDH-25MB，分辨力 $0.1 \mu\text{m}$)对零件样品结构外径进行测量，检测序号为0，每个零件样品测量5次并取平均值作为最终结果，不同零件结构外径的千分尺测量结果如表1所示。

表1 样品结构外径的千分尺测量结果

Tab. 1 Micrometer measurement results of sample structural diameter

检测序号	电极管外径/ mm	电极丝裸丝 外径/mm	电极丝外径/ mm	装配体外径/ mm
0	1.982 7	0.824 6	0.842 5	1.983 3

之后，利用图1所示的同轴热电偶结构外径高精度测量装置分别开展电极管、电极丝和装配体3种样品结构外径的视觉测量实验，每个样品重复测量10次(对应检测序号1~10)，单次测量时间小于1s。电极管样品的实物图及图像处理结果如图4所示。

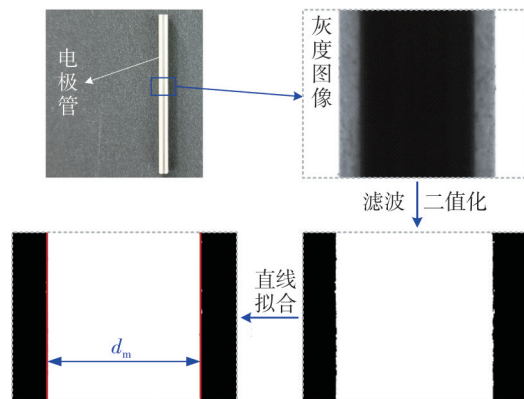


图4 电极管实物图及图像处理结果

Fig. 4 Electrode tube sample and image processing results

电极丝和装配体的实物图及其灰度图像分别如图 5(a) 和 (b) 所示, 图 5(a) 中序号①代表电极丝裸丝, 序号②代表电极丝(表面具有绝缘漆层)。电极丝和同轴热电偶装配体的图像处理流程与电极管完全一致。

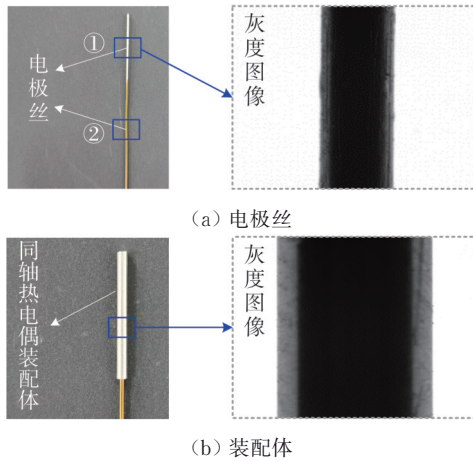


图 5 电极丝和装配体实物图及灰度图

Fig. 5 Samples of electrode wire and assembly and their gray scale pictures

不同样品结构外径的视觉测量结果如表 2 所示, 同时给出了测量平均值、标准差及重复性误差。综合分析可知, 本文视觉测量系统针对同轴热电偶结构外径检测具有较高稳定性, 其标准差均在亚微米量级, 重复性误差均在 0.06% 以内。

表 2 样品结构外径的视觉测量结果

Tab. 2 Visual measurement results of sample structural diameter

检测序号	电极管 外径/mm	电极丝① 外径/mm	电极丝② 外径/mm	装配体 外径/mm
1	1.983 6	0.825 2	0.843 6	1.983 8
2	1.983 0	0.825 8	0.842 5	1.983 9
3	1.983 7	0.825 1	0.843 0	1.983 8
4	1.983 2	0.824 9	0.843 3	1.984 1
5	1.983 4	0.824 7	0.843 4	1.983 9
6	1.983 1	0.824 4	0.842 8	1.984 1
7	1.983 7	0.825 8	0.843 1	1.984 3
8	1.983 5	0.825 5	0.842 9	1.983 9
9	1.983 6	0.824 9	0.843 5	1.984 4
10	1.983 2	0.825 4	0.842 8	1.983 7
平均值/mm	1.983 4	0.825 2	0.843 1	1.984 0
标准差/mm	2.6×10^{-4}	4.6×10^{-4}	3.5×10^{-4}	2.6×10^{-4}
重复性误差/%	0.01	0.06	0.04	0.01

3.2 测量误差分析

本文通过综合分析平均绝对误差 R 、平均相对误差 δ 、最大绝对误差 R_{\max} 来评估视觉测量方法的可靠性。为了更加直观地对比不同零件样品结构外径的测量可靠性, 不同样品视觉测量结果对

比数显千分尺测量结果的误差统计情况如图 6 所示。综合分析可知, 不同样品结构外径的视觉测量结果平均值与千分尺测量误差稳定在 $1 \mu\text{m}$ 以内, 相对误差稳定在 0.1% 以内, 绝对误差均在 μm 量级, 平均绝对误差低至 $0.6 \mu\text{m}$, 误差数据波动平稳, 最大绝对误差不超过 $1.2 \mu\text{m}$ 。

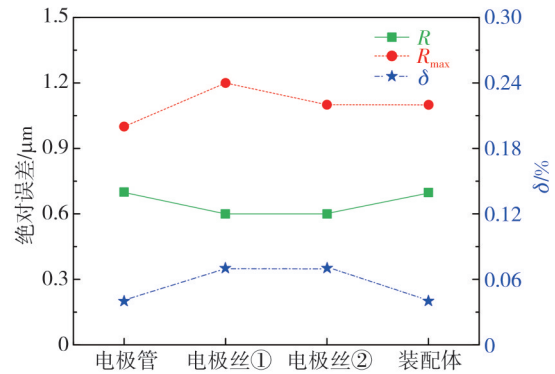


图 6 不同样品结构外径的视觉测量误差统计

Fig. 6 Error statistics of sample structural diameters by visual measurement

综上所述, 本文机器视觉测量装置和方法具备较高的测量精度和较低的重复性误差, 测量结果稳定可靠, 可满足当前飞行器测热试验对同轴热电偶结构件的装配需求。

4 结 论

本文建立了一种同轴热电偶结构外径高精度测量系统与方法, 设计了一套双远心视觉测量系统, 测量过程简单。并针对该系统测量重复性和误差进行了实验测试, 结果表明系统能够准确且稳定地测量同轴热电偶零配件的结构外径, 测量误差均在 μm 量级, 平均测量误差低至 $0.6 \mu\text{m}$, 最大测量误差不超过 $1.2 \mu\text{m}$, 证明本文方法具有足够高的测量精度, 有助于及时判定并剔除不合格品, 保证同轴热电偶装配一致性及其与飞行器模型表面预制通孔之间的装配质量。将来可在此基础上通过耦合机电控制实现批量样品的流水线式快速自动检测。

参考文献:

[1] 刘初平. 气动热与热防护试验热流测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 1-12.
 [2] LOEHLE S. Review of heat flux measurements for high enthalpy flows [C]//32nd AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, 2016: 3205.

- [3] 张雁恒, 庄宇, 支冬, 等. 超高速风洞温敏漆膜基结构传热特性分析[J]. 上海航天(中英文), 2024, 41(4): 11-18.
ZHANG Yanheng, ZHUANG Yu, ZHI Dong, et al. Analysis on heat transfer characteristics of film-based structures with temperature sensitive paint in hypersonic wind tunnels[J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2024, 41(4): 11-18. (in Chinese)
- [4] 张雁恒, 庄宇, 支冬, 等. 激波风洞TSP膜基结构表面温升特性研究[J]. 宇航学报, 2024, 45(11): 1799-1808.
ZHANG Yanheng, ZHUANG Yu, ZHI Dong, et al. Research on surface temperature rise characteristics of TSP film-based structure in shock tunnel[J]. Journal of Astronautics, 2024, 45(11): 1799-1808. (in Chinese)
- [5] 彭治雨, 石义雷, 龚红明, 等. 高超声速气动热预测技术及发展趋势[J]. 航空学报, 2015, 36(1): 325-345.
PENG Zhiyu, SHI Yilei, GONG Hongming, et al. Hypersonic aeroheating prediction technique and its trend of development[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(1): 325-345. (in Chinese)
- [6] 朱广生, 聂春生, 曹占伟, 等. 气动热环境试验及测量技术研究进展[J]. 实验流体力学, 2019, 33(2): 1-10.
ZHU Guangsheng, NIE Chunsheng, CAO Zhanwei, et al. Research progress of aerodynamic thermal environment test and measurement technology[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2019, 33(2): 1-10. (in Chinese)
- [7] 李强, 江涛, 陈苏宇, 等. 激波风洞边界层转捩测量技术及应用[J]. 航空学报, 2019, 40(8): 66-77.
LI Qiang, JIANG Tao, CHEN Suyu, et al. Measurement technique and application of boundary layer transition in shock tunnel[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(8): 66-77. (in Chinese)
- [8] 罗小燕, 林龙飞, 蔡改贫. 基于图像处理的矿石粒度在线检测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2015(7): 63-64.
LUO Xiaoyan, LIN Longfei, CAI Gaipin. Ore particle size online detecting system based on image processing[J]. Instrument Technique and Sensor, 2015(7): 63-64. (in Chinese)
- [9] 代国成, 罗哉, 江文松, 等. 基于机器视觉的小尺寸外螺纹关键参数检测方法[J]. 制造技术与机床, 2023(8): 161-165.
DAI Guocheng, LUO Zai, JIANG Wensong, et al. Detection method of key parameters of small external thread based on machine vision[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2023(8): 161-165. (in Chinese)
- [10] 郭烽, 赵鹏飞, 王福明, 等. 基于机器视觉几何特征参数的大蒜根部尺寸预测[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2020, 41(4): 318-323.
GUO Feng, ZHAO Pengfei, WANG Fuming, et al. Prediction of garlic root size based on geometric feature parameters of machine vision[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2020, 41(4): 318-323. (in Chinese)
- [11] HUANG J D. Defect feature recognition method of glass fibre-reinforced structure based on visual image analysis[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2022, 13(1): 61-67.
- [12] 王锐锋, 徐智浩, 刘成沛, 等. 机械系统直轴零件直径高精度视觉测量方法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2023(7): 111-116.
WANG Ruifeng, XU Zhihao, LIU Chengpei, et al. Research on high-precision visual measurement method of diameter of straight-axis parts of mechanical system[J]. Instrument Technique and Sensor, 2023(7): 111-116. (in Chinese)
- [13] SUN Q, HOU Y, TAN Q, et al. Shaft diameter measurement using a digital image[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 55: 183-188.
- [14] 石照耀, 董定雨, 叶勇, 等. 小尺寸轴类零件快速测量机的设计[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(4): 10-17.
SHI Zhaoyao, DONG Dingyu, YE Yong, et al. Design of rapid measurement machine for small size shaft parts[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(4): 10-17. (in Chinese)
- [15] 李学哲, 王菲, 申瑶, 等. 基于2D激光技术的轴径在线精密测量方法[J]. 制造技术与机床, 2023(6): 157-161.
LI Xuezhe, WANG Fei, SHEN Yao, et al. Method of on-line precision measurement of shaft diameter based on 2D laser technology[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2023(6): 157-161. (in Chinese)
- [16] YANG G, WANG Y. Three-dimensional measurement of precise shaft parts based on line structured light and deep learning[J]. Measurement, 2022, 191: 110837.
- [17] GAO L, WANG Z, LIU Y, et al. Vision measurement technique of axle based on double beam[J].

- Optik, 2018, 174: 757-765.
- [18] 马江龙, 辛若铭, 许斌. 基于机器视觉的小模数齿轮几何参数测量方法研究[J]. 机电技术, 2021, 44(3): 24-26.
MA Jianglong, XIN Ruoming, XU Bin. Research on measuring method of geometric parameters of small modulus gear based on machine vision[J]. Mechanical & Electrical Technology, 2021, 44(3): 24-26. (in Chinese)
- [19] 倪洪启, 李宝立, 隋国于. 基于机器视觉的波纹补偿器轴向尺寸检测方法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(7): 159-164.
NI Hongqi, LI Baoli, SUI Guoyu. Machine vision-based inspection method for axial dimension of corrugated compensator[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(7): 159-164. (in Chinese)
- [20] 邹意林. 基于机器视觉的圆形刀刃质量检测系统[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [21] 江涛, 李强, 陈苏宇, 等. 基于Otsu和FMM方法的风洞试验图像修复[J]. 航空学报, 2020, 41(2): 106-113.
JIANG Tao, LI Qiang, CHEN Suyu, et al. Image inpainting of wind tunnel test based on Otsu method and FMM [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(2): 106-113. (in Chinese)
- [22] 巢渊, 唐寒冰, 刘文汇, 等. 基于改进Zernike矩的轴类零件尺寸测量方法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(3): 169-176.
CHAO Yuan, TANG Hanbing, LIU Wenhui, et al. Improved Zernike moment-based dimensional measurement method for shaft parts [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(3): 169-176. (in Chinese)
- [23] 梁智滨. 基于机器视觉的刀具豁口检测系统关键技术研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2021.
- [24] 兰俊锋. 基于机器视觉的活塞形位高精度检测系统的设计与实现[D]. 济南: 济南大学, 2021.
- [25] 张喜民, 詹海生, 余奇颖. 基于投票约束的Hough变换直线检测算法[J]. 电子设计工程, 2023, 31(19): 89-93.
ZHANG Ximin, ZHAN Haisheng, YU Qiyang. Hough transform line detection algorithm based on voting constraints [J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(19): 89-93. (in Chinese)